

UNIVERSITÉ DE PARIS

FACULTÉ DE PHARMACIE

Année 1933-1934. — N° 18

ÉTABLISSEMENT
D'UN
SYSTÈME THERMOSTATIQUE RATIONNEL

APPLICATIONS PRATIQUES

THÈSE

POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME SUPÉRIEUR DE PHARMACIEN

Présentée et soutenue le 7 juillet 1934

PAR

PAUL GESTEAU

ASSISTANT À LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE PARIS

Jury { MM. TASSILLY, *Président.*
FABRE, *Professeur.*
DELABY, *Agrégé.*

MAYENNE
IMPRIMERIE FLOCH

1934

ÉTABLISSEMENT
D'UN
SYSTÈME THERMOSTATIQUE RATIONNEL

APPLICATIONS PRATIQUES

UNIVERSITÉ DE PARIS

FACULTÉ DE PHARMACIE

Année 1933-1934. — N° 18

ÉTABLISSEMENT
D'UN
SYSTÈME THERMOSTATIQUE RATIONNEL

APPLICATIONS PRATIQUES

THÈSE

POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME SUPÉRIEUR DE PHARMACIEN

Présentée et soutenue le juillet 1934

PAR

PAUL GESTEAU

ASSISTANT A LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE PARIS

Jury } MM. TASSILLY, *Président.*
FABRE, *Professeur.*
DELABY, *Agrégé.*

MAYENNE
IMPRIMERIE FLOCH

1934

PERSONNEL DE LA FACULTÉ DE PHARMACIE

ADMINISTRATION

MM. GUÉRIN, *Doyen*, O. *, ☉ I.
P. LEBEAU, *Assesseur*, O. *, ☉ I.
P. DESPORT, *Secrétaire*, *, ☉ I.

PROFESSEURS

MM. GUÉRIN, O. *, ☉ I. Botanique générale.
BÉHAL, Membre de l'Institut, G.O. *, ☉ I. Chimie organique.
PERROT, O. *, ☉ I. Histoire naturelle des médicaments.
COUTIÈRE, O. *, ☉ I. Zoologie.
LEBEAU, O. *, ☉ I. Pharmacie chimique.
BOURGAULT, *, ☉ I. Chimie analytique.
GORIS, *, ☉ I. Pharmacie galénique.
TASSILLY, O. *, ☉ I. Physique.
DAMIENS, *, ☉ I. Chimie minérale.
HÉRISSEY, O. *, ☉ I. Chimie biologique.
SOMMELET, *, ☉ I. Hydrologie et Hygiène.
LUTZ, *, ☉ I. Cryptogamie et Microbiologie.
FABRE, *, ☉ I. Toxicologie.
LAUNOY, O. *, ☉ I. Professeur sans chaire.

Doyen honoraire : M. RADAIS, O. *, ☉ I.

Professeurs honoraires : MM. DELÉPINE, O. *, ☉ I. et GUERBET, *, ☉ I.

CHARGÉS DE COURS

MM. Marc HONNORAT, *, ☉ I. Législation et Déontologie pharmaceutiques.
LAUNOY, O. *, ☉ I. Pharmacodynamie.
DELABY, *, ☉ I. Minéralogie.
PICON, ☉ I. Chimie minérale.
BACH, ☉ I. Microbiologie.

AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM. DELABY, *, ☉ A.	MM. BACH, ☉ I.
PICON, ☉ I.	BEDEL, ☉ I.
MASCRE, ☉ I.	RÉGNIER, ☉ I.
FLEURY, ☉ I.	

CHEFS DES TRAVAUX PRATIQUES

MM. BEDEL, ☉ I., *agrégé*, chargé des T. P. de 1^{re} année. Chimie générale.
FLEURY, ☉ I. et RÉGNIER, ☉ I. : *agrégés*,
chargés des travaux de Chimie analytique.
SOUÈGES, ☉ I. Micrographie.
LEROUX, ☉ I. Physique.
DEVAL, *, ☉ I. Microbiologie.
DELABY, *, ☉ I., PICON, ☉ I. et MASCRÉ, ☉ I. :
agrégés, chargés des travaux généraux de 4^e année.
Bibliothécaire en Chef : M. BERNARD, ☉ I.



A MON MAITRE

MONSIEUR LE PROFESSEUR E. TASSILLY

Professeur de Physique à la Faculté de Pharmacie de Paris,
Officier de la Légion d'honneur.

Hommage de respectueuse reconnaissance.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR R. FABRE

Professeur de Toxicologie à la Faculté de Pharmacie de Paris,
Chevalier de la Légion d'honneur.

Témoignage de profonde gratitude.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR AGRÉGÉ DELABY

Chevalier de la Légion d'honneur.

Remerciements et hommages respectueux.

A MONSIEUR H. LEROUX

qui, le premier, m'a initié aux recherches de laboratoire.

Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma reconnaissance.

MEIS ET AMICIS



Digitized by the Internet Archive
in 2026

ÉTABLISSEMENT D'UN SYSTÈME THERMOSTATIQUE RATIONNEL

APPLICATIONS PRATIQUES

AVANT-PROPOS

Ce travail a été exécuté au Laboratoire de Physique de la Faculté de Pharmacie de Paris.

Avant d'en commencer l'exposé, nous tenons à rendre un sincère hommage à notre Maître, M. le Professeur Tassilly, auprès de qui nous avons constamment trouvé l'appui d'une expérience sûre et éclairée. Nous le prions de bien vouloir recevoir ici l'expression de notre profonde gratitude et de notre respectueux attachement.

Nos remerciements et notre reconnaissance vont également à M. le Professeur Fabre qui nous a toujours réservé le plus bienveillant accueil et dont les judicieuses critiques nous ont guidé dans notre travail.

Enfin, nous tenons aussi à adresser de bien vifs remerciements à M. Delaby, Professeur agrégé, qui a bien voulu nous faire l'honneur de faire partie du Jury de cette Thèse, pour la sympathie qu'il nous a toujours témoignée.

INTRODUCTION

Le problème de la régulation de la température peut être envisagé sous deux aspects :

1^o Le côté théorique, où le but poursuivi est exclusivement l'obtention d'une température absolument fixe;

2^o Le côté pratique, où l'on cherche à atteindre pour les déterminations expérimentales, le maximum de précision.

Dans le premier cas, il est toujours possible de se placer dans les conditions optima, et l'on s'efforce de réduire au minimum les variations de température.

Dans le second, au contraire, l'obtention d'une température fixe vient s'ajouter à d'autres conditions expérimentales. Le but poursuivi est alors d'atteindre le maximum de stabilité compatible avec la bonne marche de l'expérience.

C'est à l'étude de ce côté pratique que ce travail est destiné. Nous ne visons pas à obtenir le 1/000^e de degré dans les enceintes où le régulateur, la source de chaleur et le thermomètre occupent la plus grande partie de la place disponible. Une précision de l'ordre du 1/50^e de degré obtenue avec sûreté nous semble être pratiquement suffisante dans la plupart des mesures que nous sommes le plus souvent appelés à effectuer. C'est à la solution de ce problème que nous avons consacré nos efforts.

Les recherches expérimentales nécessitant des températures régulières sont de deux sortes.

Dans certains cas, on cherche à éliminer l'influence de la température sur l'évolution du phénomène étudié et, pour rendre les résultats obtenus comparables, on opère toujours à la même température (par exemple étude de la viscosité de liquides différents à la même température). Parfois, au contraire, on veut établir la loi qui régit les variations de certaines propriétés avec la température (étude de la viscosité d'un liquide en fonction de la température).

Dans une certaine mesure, l'emploi de la constance de certaines propriétés physiques (point d'ébullition ou de congélation de substances

pures, point d'ébullition de solutions salines) peut permettre la solution pratique de ces problèmes. Cependant, par ce procédé, on ne peut pas satisfaire à tous les besoins expérimentaux. Le nombre limité de températures qu'il permet d'obtenir oblige, pour l'étude des phénomènes à des températures intermédiaires, à recourir à des interpolations qui ne peuvent donner que des résultats relatifs.

Le but de ce travail est l'étude d'une méthode permettant de résoudre, rationnellement et dans tous les cas, le problème de la régulation de température. Pour établir cette méthode nous avons été amené à étudier les diverses sources de chaleur, les lois qui régissent les échanges thermiques et les conséquences qui en découlent, les régulateurs de température et les dispositifs thermostatiques.

Nous diviserons donc cet exposé en trois chapitres.

Dans le premier : nous étudierons les différentes sources de chaleur susceptibles d'être utilisées et par des expériences personnelles nous motiverons notre préférence pour le chauffage électrique qui sera l'objet d'une étude plus approfondie. Nous rappellerons ensuite les principales lois de la transmission de la chaleur. Nous les appliquerons au cas étudié et en tirerons des déductions théoriques que nous vérifierons expérimentalement. Nous terminerons par la description de réalisations pratiques basées sur ces considérations.

Le second chapitre sera consacré à l'étude critique du fonctionnement d'un régulateur. Nous serons ainsi conduit, après avoir fait l'examen des différents types de régulateurs et des perfectionnements qui leur ont été apportés, à la construction d'un régulateur simple, sensible, précis et fidèle, d'emploi pratique et sûr.

Enfin, au cours du dernier chapitre, nous exposerons une méthode générale permettant d'obtenir rationnellement une température constante. Dans le cas d'expériences de courte durée, ou permettant un très bon isolement, l'emploi d'un régulateur ne nous paraîtra pas indispensable. Nous étudierons ensuite la réalisation d'un dispositif thermostatique permettant, en appliquant la méthode proposée, de résoudre très facilement la plupart des difficultés que présente pratiquement le problème de la régulation de la température. Nous terminerons ce travail par l'exposé de quelques applications pratiques de cette méthode aux recherches physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques.

CHAPITRE PREMIER

SOURCES DE CHALEUR ET ENCEINTES

Les éléments constituant un ensemble thermostatique sont :

A) Une source de chaleur apportant les calories nécessaires :

- 1° A élever le niveau thermique du milieu que l'on veut étudier;
- 2° A maintenir constant ce niveau.

B) Une enceinte où l'on effectue la mesure.

C) Un régulateur de température agissant sur la source de chaleur en réglant son débit calorifique.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier les deux premiers éléments.

I. — SOURCES DE CHALEUR

A. — Généralités.

On peut les classer en deux catégories principales :

- 1° Les sources de chaleur par combustion;
- 2° Les sources de chaleur par échange thermique.

Les premières, nécessitant la présence d'oxygène en excès et produisant des gaz de combustion, doivent être extérieures à l'enceinte. Elles utilisent des substances solides (bougies, métaldéhyde), liquides (alcool, pétrole, essence), gazeuses (gaz d'éclairage, acétylène, air carburé, gaz butane).

Les secondes, au contraire, peuvent être placées à l'intérieur de l'enceinte, au sein même du fluide à maintenir à température constante. Les plus fréquemment utilisées sont la circulation de vapeur ou de liquide préalablement chauffés, et le chauffage électrique.

Leur action sur l'enceinte a deux buts auxquels correspondent deux régimes principaux. D'abord elles doivent élever la température

de l'enceinte, de la température ambiante à la température d'utilisation. A cet effet, correspond une puissance calorifique utilisable, dont l'importance est fonction de la valeur en eau de toute la masse à échauffer, de la vitesse de chauffe que l'on désire réaliser, et des pertes thermiques de tout le système.

Ensuite, leur action se borne à maintenir l'équilibre thermique, et la puissance calorifique nécessaire n'est plus alors proportionnelle qu'à la déperdition de calories.

Il nous semble utile de définir quelques termes qui seront fréquemment employés au cours de cet exposé.

Nous désignerons par « puissance calorifique théorique d'une source de chaleur » le nombre de calories minute produites par la combustion complète du combustible brûlé pendant le même temps.

Par « puissance calorifique utilisable » le nombre de calories minute employées dans le but poursuivi.

Par « rendement calorifique » le rapport
$$\frac{\text{puissance utilisable}}{\text{puissance théorique}}$$

Pour l'application envisagée, une source de chaleur doit avoir un rendement stable, peu influencé par les variations extérieures, et ne variant pas sensiblement avec la puissance calorifique théorique. Nous allons étudier comment sont remplies ces conditions par les diverses sources de chaleur susceptibles d'être utilisées.

B. — Sources de chaleur par combustion.

Elles utilisent la combustion plus ou moins complète de certaines substances solides, liquides ou gazeuses. La combustion s'effectue le plus souvent dans des brûleurs dont le but est d'amener au contact du combustible la quantité nécessaire et suffisante d'oxygène. Divers procédés sont mis en œuvre pour amener le combustible au lieu de combustion. Pour les combustibles solides il n'existe pas de brûleur proprement dit et un ressort amène au contact de l'air le combustible au fur et à mesure de son utilisation. Leur emploi dans l'application envisagée n'est qu'accidentelle. Notons, qu'industriellement, les principes énoncés plus haut sont respectés (foyers soufflés, grilles sans fin servant à l'apport régulier du charbon).

Pour les combustibles liquides, les brûleurs à mèches ont été longtemps utilisés. La combustion s'effectue à la surface externe d'une mèche plongeant dans une réserve de combustible qui se transporte par

capillarité . On tend, de plus en plus, à leur substituer des dispositifs dans lesquels, soit par la pression que produit une pompe auxiliaire soit par les positions relatives du réservoir et du brûleur, soit par aspiration qu'un chauffage préalable permet d'obtenir, le combustible, passant dans un gicleur, est pulvérisé et mélangé intimement à l'air. Ce mélange est projeté sur une plaque métallique chaude au contact de laquelle il se gazéifie et s'enflamme.

Enfin les brûleurs utilisant les combustibles gazeux sont tous basés sur le principe suivant : le combustible arrive au brûleur par des conduites où il est soumis à une certaine pression, variable suivant les combustibles. Ce brûleur comprend un petit orifice nommé injecteur d'où le gaz combustible s'échappe. En raison de la vitesse qu'il acquiert, ce gaz entraîne une certaine quantité d'air qu'une ouverture latérale de grandeur variable permet de régler; l'air ainsi mélangé au gaz est appelé air primaire. Ce dispositif a pour but d'augmenter la quantité d'oxygène servant à la combustion. Le mélange ainsi obtenu est enflammé à l'extrémité du brûleur où la combustion nécessite la consommation d'une nouvelle quantité d'air, appelé air secondaire. Les dimensions respectives de l'injecteur et de l'ouverture d'admission de l'air sont variables suivant la nature du gaz et sa pression d'utilisation. Le but poursuivi est l'obtention stable d'une flamme bleue, signe d'une combustion complète.

Examinons maintenant comment varie le rendement de ces sources de chaleur. Nous n'envisagerons ici que les variations provenant de la source de chaleur proprement dite. Dans les expériences que nous avons effectuées en employant les combustibles solides et liquides, nous nous sommes efforcé d'opérer dans des conditions extérieures identiques. Nous avons exécuté ces recherches dans la même pièce. Le récipient contenant le fluide chauffé était une capsule de Pyrex et renfermait 250 c. c. d'eau. Le diamètre extérieur de cette capsule était de 15 centimètres, et l'écart de température entre l'air ambiant et l'eau de la capsule à la fin de l'expérience, était, dans tous les cas, de 40°. Nous avons noté pour chaque expérience :

- 1° Le poids de combustible utilisé;
- 2° La durée de l'expérience;
- 3° La distance de la partie la plus basse de la flamme au fond de la capsule;
- 4° La surface du fond de la capsule touchée par la flamme (pour mesurer approximativement cette surface, nous avons employé des disques de carton de diamètre croissant de 1/2 en 1/2 centimètre. Nous

avons convenu d'apprécier cette surface par le diamètre du plus petit disque empêchant de voir la flamme à travers la capsule Pyrex).

Nous nous sommes successivement servi de bougie, de métal-déhyde, d'alcool à différents titres, de pétrole, d'essence. Les brûleurs utilisés avec les combustibles liquides étaient des brûleurs à mèches; la puissance calorifique des brûleurs à liquides gazéifiés étant trop considérable pour obtenir des résultats comparables en conservant les mêmes données expérimentales.

Pour le calcul des puissances calorifiques théoriques, nous avons pris comme chaleur de combustion de la bougie, celle de l'acide stéarique soit 9.429 calories (STOHMAN) (1).

Pour la métaldéhyde, la chaleur de combustion par gramme est de 6.098 calories (LOUGUINE) (2).

D'autre part nous avons utilisé, afin d'obtenir une puissance calorifique plus faible, de l'alcool à 75° et nous avons admis que sa chaleur de combustion était celle de l'alcool absolu contenu dans l'alcool utilisé, ce qui n'est pas rigoureusement exact par suite de l'évaporation de l'eau au cours de la combustion; mais cela suffit pour l'approximation de l'expérience. La chaleur de combustion de l'alcool étant par gramme de 7.080 calories, nous admettons que 1 gramme d'alcool à 75°, renfermant 0 gr. 6793 d'alcool absolu, produira par combustion 4.809 calories.

Nous avons également utilisé de l'alcool à brûler à 7.800 calories gramme, du pétrole à 11.000 calories gramme et de l'essence tourisme à 11.500 calories gramme. Le tableau ci-après résume les résultats expérimentaux que nous avons obtenus. Les chiffres correspondant aux déterminations effectuées avec l'essence tourisme n'y sont pas mentionnés. Les résultats obtenus ne sont pas en effet comparables aux autres par suite d'une combustion trop incomplète (brûleur à mèche) ou d'un débit calorifique trop différent (brûleur à essence gazéifiée). De ce tableau (page 16) nous pouvons tirer les conclusions suivantes.

Dans les conditions de l'expérience :

A surface de chauffe égale, le rendement croît avec la puissance calorifique. (Expériences III et IV-VI et VII. Remarquons à ce sujet que

$$\text{dans le dispositif étudié le rapport} \frac{\text{surface de chauffe}}{\text{surface du fond du récipient}}$$

est toujours très faible. Il est probable que dans le cas d'une plus

1. STOHMAN. — *J. f. prakt. Chem.*, 1885 (2), **31**, 299.

2. LOUGUINE. — *C. R. Ac. Sc.*, 1889, **108**, 620.

EXPÉRIENCE		I	II	III	IV	V	VI	VII
Combustible	Bougie		Meta	Alcool à 75°	Alcool à brûler	Alcool à brûler	Pétrole	Pétrole
Brûleur	—		—	Lampe de labo à mèche	a	b	I	II
Température (ambiance).	12°5	12	12	14	13	15	14,5	14,5
Temp. finale	52°5	52	52	54	53	55	54,5	54,5
Durée	24 m.	4 m. 48 s.	31 min.	31 min.	14 min.	6 min.	15 min.	28 m. 5 s.
Distance moyenne du fond de la capsule.	4 cm.	2 cm.	3 cm. 5	3 cm. 5	3 cm. 5	3 cm. 5	1 cm. 5	1 cm. 5
Poids du combustible brûlé.	3 gr.	3 gr. 85	6 gr.	6 gr.	3 gr.	4 gr.	2 gr. 5	3 gr. 5
Pouv. calorifique du combustible (par gr.).	9.499	6.098	4.809	4.809	7.800	7.800	11.000	11.000
Puissance calorifique minute.	1.187 cal.	4.890 cal.	930 cal.	930 cal.	1.641 cal.	5.200 cal.	1.826 cal.	1.342 cal.
Nombre de calories produites.	28.497	23.477	28.854	28.854	23.400	31.200	27.500	38.500
Nombre de calories utilisées.	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Surface de chauffe (diam. du disque).	1	3	2	2	2	3	2,5	2,5
Rendement moyen	35 %.	42 %	34,6 %	34,6 %	42 %	32 %	36 %	26 %

grande surface de chauffe les résultats seraient moins probants et pourraient être inversés. En effet, des expériences IV et V, nous pouvons déduire que, toutes choses égales d'ailleurs, le rendement décroît quand la surface de chauffe augmente et ce, dans de très grandes proportions, puisque le rendement, calculé d'après les résultats expérimentaux, diminue, malgré une puissance calorifique environ quatre fois plus grande. En admettant une variation linéaire du rendement avec la puissance calorifique, ce qui n'est pas tout à fait exact par suite de l'augmentation des pertes de chaleur par convection, on calcule en se basant sur les résultats des expériences III et IV qu'une source d'une puissance calorifique de 5.200 calories utilisée dans les mêmes conditions aurait un rendement de 75 p. cent environ. Or, par suite de l'augmentation de la surface de chauffe de 50 p. cent, le rendement obtenu dans l'expérience V, n'atteint que 32 p. cent.

Nous avons également cherché à nous rendre compte de l'importance des variations du rendement avec les variations de température du milieu extérieur. A cet effet, nous avons noté les variations de température avec le temps, et calculé les rendements lorsque la température de l'eau était de 10, 20, 30 et 40 degrés supérieure à l'ambiance. Le chauffage au pétrole par brûleur à mèche, dont le débit nous a semblé présenter les meilleures garanties de stabilité, a été utilisé pour ces recherches. Nous nous sommes placés dans les mêmes conditions expérimentales, que précédemment, même capsule, même quantité d'eau, etc.

Le tableau ci-dessous résume ces expériences :

EXPÉRIENCE I		EXPÉRIENCE II	
—Débit . . . 0 gr. 166 par minute		Débit . . . 0 gr. 122 par minute	
—Puissance calorifique min. 1.826 c		Puissance calorifique min. . 1.342 c	
—Température extérieure. . 16°		Température extérieure . . 16°	
Température	Temps	Température	Temps
26°	3 min. 33	27°	4 min.
31°	5 min.	30°	5 min.
35°	6 min. 66	32°	6 min.
46°	10 min.	35°	8 min.
49°	11 min.	37°	9 min.
56°	15 min.	38°5	10 min.
		43°	13 min.
		46°	15 min.
		50°	19 min.
		51°	20 min.
		53°	22 min. 5
		54°	26 min. 33
		55°	27 min. 5

Ces résultats traduits par les courbes (fig. 1) nous ont permis de calculer que, pour une différence de température avec l'ambiance de :

10°	les rendements ont été de	44	% (Exp. I)	et de	43	% (Exp. II)		
20°	—	—	44	%	—	33	%	—
30°	—	—	41	%	—	19	%	—
39°	—	—	30,5	%	—	12	%	—

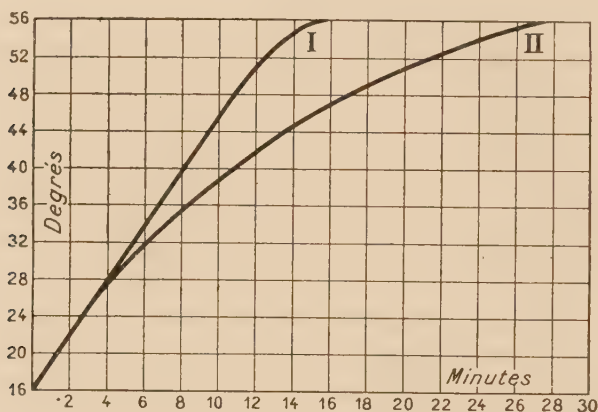


FIG. 1. — Variation du Rendement calorifique d'une source de chaleur par combustion.

I. — Forte puissance calorifique.

II. — Faible puissance calorifique.

Ces chiffres nous montrent que l'influence des variations de température de l'ambiance est d'autant plus grande que la puissance calorifique est faible et que la température de l'enceinte est plus élevée. Dans l'expérience I, par exemple, une variation de 5°, lorsque la température de l'enceinte est supérieure de 15° environ à celle du milieu ambiant, n'a que peu d'action sur le rendement, tandis que la même variation, pour un écart de 35° avec l'ambiance, fait varier de plus de 12,5 p. cent le rendement de la source de chaleur. Dans l'expérience II où la puissance calorifique est moindre, cette variation de 12,5 p. cent est obtenue dans les mêmes conditions pour un écart de 15°, et devient de 18 p. cent lorsqu'on atteint une différence de température de 35°.

Il résulte de toutes ces expériences que les rendements calorifiques obtenus au moyen des sources utilisant les combustibles liquides sont très variables suivant les conditions expérimentales. A ces causes de variation viennent s'ajouter des perturbations provenant des conditions de fonctionnement des dispositifs d'utilisation (variation du niveau du liquide dans le réservoir, carbonisation plus ou moins importante et rapide de la mèche, variation de pression dans les réservoirs des appa-

reils à combustibles liquides gazéifiés). Ces sources ne présentent donc pas les qualités requises pour l'application que nous envisageons.

L'étude des rendements des combustibles gazeux nous conduit à des conclusions analogues. Sur ce sujet, M. BIARD (3) dans une étude sur les brûleurs à usage domestique montre, dans une série d'expériences, que le rendement varie dans de grandes proportions avec la surface de chauffe, la distance du fond du récipient au brûleur, le débit de ces brûleurs. Suivant cet auteur le rendement est également très variable avec la forme des récipients. C'est ainsi que le rendement d'un bec Meker utilisé avec une casserole en aluminium de 16 centimètres de diamètre a été de 50,8 p. cent, alors que dans les mêmes conditions expérimentales, on n'a pu obtenir en employant une capsule de porcelaine de 21 cm. 5 de diamètre qu'un rendement de 32,3 p. cent. Enfin des expériences personnelles sur l'influence de l'écart de température entre l'enceinte et l'ambiance nous ont donné des résultats identiques à ceux obtenus avec les combustibles liquides.

De l'étude que nous venons de faire des différentes sources de chaleur par combustion, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Par suite de leur rendement très variable, influencé par les conditions extérieures et la puissance calorifique mise en jeu, ces modes de production de chaleur ne sont guère susceptibles d'être employés avec profit pour l'obtention de températures stables. Cependant dans beaucoup de cas, elles seront les seules que les expérimentateurs auront à leur disposition (laboratoires d'armée, missions scientifiques). Ces chercheurs et pour obtenir des températures aussi constantes que possible devront, employer des méthodes basées sur la production de phénomènes physiques à température constante (changement d'état; point d'ébullition des solutions salines). Dans ce cas la puissance calorifique de la source sera largement calculée de manière à entretenir, quelle que soit la température extérieure, la production du phénomène utilisé. Dans ces conditions, seules les déterminations par approximation seront possibles.

Sur ce principe signalons les étuves imaginées par le Dr ABATI (4). MACKALL C. M., MILLER G. E. et REED E. E. (5) HOLDE (6) qui utilisent

3. BIARD (E.). — *Semaine Gazière*, 1932, 120.

4. ABATI. (G.). — Dr. Peters et Rost Neue Laboratorum Apparate, 1902, n° 37, p. 13.

5. MACKALL (C. M.), MILLER (G. E.) et REID (E. E.). — *J. Ind. Eng. Chem.*, 1923, **15**, 421.

6. HOLDE. — *Nouveautés Chimiques*, 1899, p. 38.

différents liquides. CHRIST (7) assure le réglage de la température en exerçant une pression supplémentaire au moyen d'une colonne de mercure de hauteur variable.

SUDBOROUGH (8) décrit un dispositif de chauffage de tubes scellés et emploie comme liquide le cumol (162°) et l'aniline (185°).

Enfin SCHUYTEN (9) a construit une étuve réglable de 98° à 105° par addition de nitrate de soude dans un bain-marie à niveau constant.

C. — Sources de chaleur par échange thermique.

Dans ce cas l'apport de calories à l'enceinte s'effectue, non pas par le contact direct d'une flamme, mais par l'intermédiaire d'une tuyauterie portée à température élevée et placée soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de l'enceinte. L'élévation de température de ce système peut s'effectuer soit par circulation de fluide chauffé extérieurement, soit par la production sur place de calories en utilisant la transformation d'énergie électrique en chaleur. L'absence de flamme permet un isolement important, réduisant l'influence des variations extérieures sur l'équilibre thermique recherché.

Si l'on utilise la circulation de fluide chauffé extérieurement par combustion, cette source de chaleur secondaire sera soumise aux mêmes variations que la source génératrice, et toutes les conclusions faites précédemment s'y appliquent également.

Nous allons examiner les variations de rendement du chauffage électrique avec la puissance calorifique et les écarts thermiques externes. A part quelques cas spéciaux qui dépassent le cadre de cet étude (fours électriques à arc, à induction) le chauffage électrique est basé sur l'application de la loi de JOULE, exprimée par la formule classique :

$$Q_{cal} = A \times R \text{ ohm} \times I^2 \text{ amp} \times T \text{ sec}$$

qui peut également s'écrire $Q_{cal} = A \times E \text{ volt} \times I \text{ amp} \times T \text{ sec}$

En faisant $T = 60$ cette formule nous donne la puissance calorifique minute de la source de chaleur.

Pour nous rendre compte du rendement obtenu et des variations qu'il peut subir par suite des changements de puissance calorifique nous

7. CHRIST (G.). — *Chem. Zeit.*, 1901, **25**, 1086.

8. SUDBOROUGH. — *Chem. Cent. Blatt*, 1899, **12**, 721.

9. SCHUYTEN (M. C.). — *Chem. Zeit.*, 1898, **22**, 1049.

avons réalisé l'expérience suivante. Dans un vase de Dewar de grande dimension nous avons placé 2.400 grammes d'eau. Nous y avons plongé une résistance chauffante de 37 ohms et avons entretenu dans ce milieu une agitation assez vive au moyen d'une hélice actionnée électriquement. Dans tous les cas, la température initiale a été de 25° et la température finale de 29°. La température ambiante étant restée sensiblement constante (10°). Nous avons noté d'une part les intensités du courant traversant la résistance, d'autre part, les temps nécessaires pour obtenir l'élévation de 4° envisagée. Nous avons enregistré les résultats suivants :

I (ampère)	Puis Cal. min.	t sec.	Rlt joules
2,70	3.871	165	44.474
2,1	2.342	270	44.067
1,85	1.816	360	44.326

Ces chiffres montrent que dans les trois cas envisagés le nombre de joules nécessaires pour produire l'élévation de température considérée est sensiblement constant aux erreurs de mesure près. Le rendement de la résistance employée est donc indépendant de l'allure de chauffage utilisée. Si nous prenons le chiffre moyen de 44.289 joules, nous avons dégagé 10.595 calories pour utiliser 2.400×4 soit 9.600 calories. Le rendement est donc d'environ 90 p. cent. Remarquons que pour obtenir la constance du rendement, il importe d'utiliser des résistances chauffantes ne variant pas avec la température. On devra donc proscrire pour cet usage l'utilisation, souvent conseillée dans les réalisations pratiques, de lampes à incandescence. Rappelons à ce sujet que parmi celles-ci, certaines voient leur résistance augmenter avec la température d'utilisation (lampes à filament de tungstène) tandis que d'autres (lampes à filament de carbone) ont une résistance environ deux fois plus petite à chaud qu'à froid.

Nous avons d'autre part essayé de nous rendre compte de l'influence des variations de température du milieu ambiant sur le rendement. Nous avons constaté qu'en utilisant comme récipient le vase de Dewar de l'expérience précédente, l'élévation de température de l'eau a toujours varié linéairement avec le temps de l'expérience pour des températures supérieures de 0° à 40° à la température ambiante. Dans ces conditions le rendement est constant et indépendant des variations du milieu ambiant. Pensant qu'un isolement aussi parfait ne peut pas toujours être réalisé dans les conditions expérimentales, nous avons effectué les expériences dont les conditions et les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

Récipient en fer blanc cylindrique renfermant à sa partie inférieure une résistance chauffante entourée d'une gaine métallique.

	EXPÉRIENCE I	EXPÉRIENCE II
Isolement.	0	Une couche de feutre
Voltage aux bornes. . .	110 volts	100 volts
Intensité	3,3 amp.	2,45 amp.
Puis. calorif. minute . .	5.210 calories	3.516 calories
Durée expérience. . . .	30 minutes	35 minutes
Nombre de cal. prod. . .	156.300	123.060
Poids de l'eau chauffée .	3.000 gr.	3.300 gr.
Nombre de calorie util. .	126.000	105.270
Rendement moyen . . .	80 %	85 %

TEMPS EN MINUTES DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE AVEC L'AMBIANCE

	Expérience I	Expérience II
0	0	0
5	9°5	5°
10	16°	10°
15	23°	15°
20	29°5	19°6
25	36°	24°
30	42°	28°
35		31°9

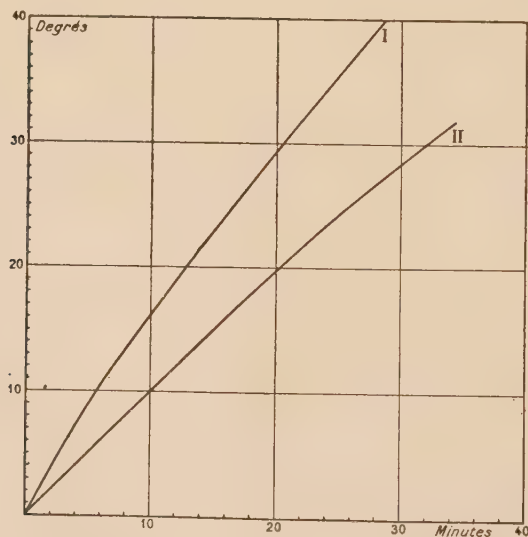


FIG. 2. — Variation du rendement calorifique du chauffage électrique.
I. — Sans isolement.
II. — Avec isolement.

Ces résultats expérimentaux sont traduits dans les courbes (fig. 2) qui permettent de calculer le rendement pour des températures supérieures de 10°, 20°, 30° et 40° au-dessus de la température ambiante. On trouve ainsi que, dans l'expérience I l'élévation minute de température pour une différence de 20° avec l'ambiance est de 1°5 ce qui correspond à $3.000 \times 1,5$ soit 4.500 calories d'où un rendement de $4.500/5.210$ soit 86 p. cent. Un raisonnement analogue nous a permis de dresser le tableau suivant :

DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE AVEC L'AMBIANCE	RENDEMENT	
	Expérience I	Expérience II
10°	86 %	93 %
20°	86 %	84 %
30°	80 %	75 %
40°	70 %	

Comme dans le cas du chauffage par combustion, nous voyons que l'influence de la température ambiante sur le rendement est d'autant plus grande que la température de l'enceinte est élevée et que la puissance calorifique est moindre, mais les variations considérées sont beaucoup plus faibles.

Cette constance du rendement rend ce mode de chauffage particulièrement recommandable pour la solution du problème envisagé. Il nous sera facile de déterminer, *à priori*, l'énergie électrique dont la transformation en chaleur servira à équilibrer les pertes. D'autre part, le rendement calorifique élevé rend cette source de chaleur très économique. L'isolement important qu'elle permet de réaliser diminue beaucoup l'influence des variations thermiques et mécaniques de l'air ambiant. Toutes ces raisons nous font choisir, de préférence à tout autre, le chauffage électrique pour l'obtention de températures constantes. Nous insisterons donc particulièrement sur les moyens permettant de réaliser ce chauffage dans les meilleures conditions expérimentales.

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

Pour obtenir de l'énergie calorifique, il faut donc disposer d'une source de courant présentant entre ses bornes une différence de potentiel fixe, d'une résistance dans laquelle s'opérera la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique et d'un mode de réglage de la puissance calorifique.

1^o Sources de courant.

A. *Secteurs.* — Le plus souvent on utilisera directement le courant distribué par les Compagnies concessionnaires de la production d'énergie électrique. Le courant fourni peut être alternatif ou continu. Son voltage est tantôt 110 volts tantôt 220 volts. Cependant, en France, on tend à adopter d'une façon générale, le courant alternatif 110 volts 50 périodes. Dans l'utilisation qui nous intéresse, il importe surtout de connaître le voltage dont on dispose, afin d'employer des résistances adéquates, capables de supporter sans fondre l'intensité du courant qui les traversent. Nous reviendrons sur ce sujet lors de l'étude des résistances chauffantes.

B. *Accumulateurs.* — Les voltages des courants de secteur sont variables. Au moment de grande utilisation (pointe), ils diminuent, tandis qu'ils sont susceptibles d'élévations brusques et importantes (parfois 20 p. cent) au moment de l'arrêt de grosses usines. Il existe, pour obvier à ces inconvénients, des régulateurs de tension. Le plus simple est constitué par une résistance fer-hydrogène, formée d'un fil de fer de section et de longueur calculées selon l'intensité du courant à régler, pour qu'il soit porté à une température voisine de 800° par un courant de voltage normal. Une surtension élève la température du fer dont la résistance à cette température croît très rapidement et limite ainsi l'intensité du courant du circuit d'utilisation. Pour éviter l'oxydation rapide du fer, celui-ci est placé dans une ampoule contenant de l'hydrogène. Ces dispositifs régulateurs, s'ils atténuent dans de grandes proportions les perturbations causées par les variations du voltage, ne les suppriment pas complètement. Dans le cas où une extrême précision est nécessaire, on peut envisager l'emploi d'accumulateurs. Les accumulateurs au plomb dont le voltage reste constant pendant la plus grande partie de la décharge sont à l'heure actuelle les seuls utilisables pour cette application. Voyons quelle énergie calorifique ils sont susceptibles de nous fournir dans les conditions normales de fonctionnement. Si l'on désigne par C la capacité en ampères heures d'un élément, le régime normal de décharge sera de $\frac{C}{10}$ ampères; d'autre part, le voltage utilisable d'un élément est de 2 volts et si la batterie comprend N éléments le voltage total sera de 2 N volts. La puissance disponible sera donc de $2 \frac{N C}{10}$ soit $\frac{N C}{5}$ watts, ce

qui correspond à $\frac{N C}{5 \times 4,18}$ soit $\frac{N C}{20,90}$ calories secondes. Ainsi un accumulateur de 3 éléments de 90 ampères heures (batterie auto) pourra fournir en service normal $\frac{3 \times 90}{20,90} = 12$ calories 918 secondes soit 774 calories minute. Ce régime pouvant être maintenu pendant dix heures l'énergie calorifique totale sera de $12,918 \times 36.000$ soit 465.048 petites calories qui peuvent permettre d'élever de 1° par minute 775 grammes d'eau, ou d'élever de 100° en dix heures la température de 4 litres 650 du même liquide. Ces chiffres montrent que le nombre de calories minutes fournies est assez faible et que si l'on utilise ce genre de générateur d'énergie électrique, on ne peut envisager son emploi que comme moyen d'entretien. La température désirée devra donc être atteinte en utilisant une autre énergie calorifique.

C. *Piles*. — L'énergie électrique produite par les piles étant relativement très faible et le voltage fourni décroissant rapidement pour les débits un peu importants par suite de la polarisation des électrodes, on ne peut songer pratiquement à l'utilisation de tels générateurs.

D. *Solutions spéciales*. — A côté de ces sources usuelles d'énergie électriques, il existe certains dispositifs de transformation permettant le réglage automatique d'un régime d'entretien. Parmi ceux-ci citons le courant anodique d'une lampe triode, utilisé par WINTON (10), commandé par les variations de la résistance de polarisation grille. Ce mode de chauffage ne permet que l'utilisation de puissance calorifique très faible. Plus intéressant nous paraît l'usage possible des relais à arc dont l'utilisation dans cet ordre d'idée ne semble pas avoir été très étudiée. Ces appareils permettent de commander des puissances beaucoup plus considérables et nous nous proposons d'envisager dans des recherches ultérieures, leur application au problème de la régulation.

2^o Résistances.

Les résistances utilisées pour le chauffage électrique au Laboratoire sont construites, au moyen de fils de constantan ou autre alliage présentant une faible variation de résistance avec la température. Le

10. WINTON (E.). — *J. Sc. Ins.*, 1929, 6, 214/217.

diamètre du fil utilisé sera fonction de l'intensité du courant qui doit le traverser; pour le choix de ce fil, on se reportera aux indications fournies par le fabricant. Il faut également envisager pour ce choix, les conditions dans lesquelles travaillera la résistance, car la température qu'elle est susceptible d'atteindre pour une intensité donnée, dépend du refroidissement extérieur et, pour un fil de diamètre déterminé, il faudra admettre une intensité plus faible si la résistance travaille dans un bain de sable que si elle est destinée au chauffage d'une étuve. Il faudra donc, pour éviter de fondre souvent les résistances chauffantes s'assurer d'un certain coefficient de sécurité. Voici comment on peut calculer cette résistance :

Soit P_c la puissance calorifique seconde maxima désirée.

E la tension disponible.

On a, d'après la loi de JOULE : $P_c = \frac{E \times I}{4,18}$

L'intensité maxima à admettre dans le fil sera donnée par I . C'est elle qui va nous guider dans le choix du diamètre du fil. Si le courant utilisé est de 110 volt on aura :

$$I = \frac{P_c \times 4,18}{E} = \frac{P_c \times 4,18}{110} = 0,038 P_c \quad (1).$$

D'autre part, $E = I \times R$ (loi d'OHM). La résistance à utiliser sera donc :

$$R = \frac{E}{I} = \frac{110}{0,038 \times P_c} = \frac{2894,7}{P_c} \quad (2).$$

Ainsi, si l'on veut obtenir une puissance de 30 calories secondes, avec un courant de 110 volts, il faudra utiliser une intensité de $30 \times 0,038 = 1$ ampère 14.

La résistance à employer sera $\frac{2894,7}{30} = 96,49$ ohms.

Ces données permettent de déterminer le diamètre et la longueur du fil constituant la résistance chauffante.

Par exemple les caractéristiques du fil vendu commercialement sous la désignation R. N. C. 2 sont les suivantes :

RÉSISTANCE EN OHM PAR 100 MÈTRES	INTENSITÉ ADMISSIBLE EN AMPÈRES	DIAMÈTRE EN MM.
15.600	0,6	10/100
6.950	1,0	15/100
3.900	1,3	2/10
2.500	1,7	25/100
1.730	2,1	3/10
1.273	2,6	35/100
975	3,1	4/10
770	4,2	45/100
624	4,8	5/10
517	5,4	55/100
434	6,0	6/10
370	6,6	65/100
318	6,9	7/10
244	9,4	8/10
193	10,9	9/10
156	13,7	10/10

Il résulte de ce tableau et du calcul précédent que le fil à utiliser dans l'exemple choisi sera le fil RNC2 2/10 et il faudra pour réaliser la résistance de 96,49 ohms prendre une longueur de :

$$\frac{100 \times 96,49}{3900} = \frac{9649}{3900} = 2,47 \text{ mètres.}$$

Comment allons-nous utiliser un tel fil? Nous envisagerons 2 cas principaux:

1^o Le milieu chauffé par la résistance n'est pas conducteur de l'électricité. Dans ces conditions il n'y a pas lieu de prendre des mesures spéciales d'isolement et le fil chauffant sera disposé dans l'enceinte à échauffer de manière à assurer une répartition rationnelle des calories. Si l'enceinte a des dimensions suffisantes, le fil sera tendu simplement sur un cadre en ayant soin de le disposer de telle sorte que la dilatation produite par l'augmentation de température, ne puisse occasionner de court-circuits accidentels. Dans le cas contraire, le fil sera bobiné et chaque spire sera écartée de ses voisines, d'un espace variable suivant le diamètre de la bobine et l'espace dont on dispose. Plus les spires seront rapprochées, plus la température atteinte sera élevée, car le refroidissement sera plus faible;

2^o Si le milieu à échauffer est conducteur, il faudra soigner particulièrement l'isolement de la résistance, afin d'éviter des court-circuits (qui détérioreraient rapidement la résistance) et la mise à la masse d'un des pôles du courant, cause possible de graves accidents,

lors des manipulations effectuées dans l'enceinte. Pour réaliser cet isolement, on place le fil résistant à l'intérieur d'un manchon étanche dont les orifices sont extérieurs au milieu conducteur. Ce manchon peut être constitué par des matériaux isolants (verre ou quartz) ou par des matériaux conducteurs (métaux). Dans ce cas, le fil chauffant est isolé du manchon soit par une feuille de mica, soit par des perles de porcelaine. Les dimensions et la forme du manchon seront calculées de manière à assurer une bonne répartition de la chaleur produite.

3° Réglage de la puissance calorifique.

Comment pourrions-nous agir sur la puissance calorifique d'une telle source de chaleur? La loi de JOULE nous montre que notre action peut s'exercer soit sur la différence de potentiel, soit sur l'intensité du courant, soit sur la résistance.

Le réglage de la différence de potentiel peut s'effectuer au moyen d'un potentiomètre. Cette solution n'est pas à envisager dans l'application étudiée par suite des dimensions et du prix qu'atteindrait un tel appareil.

L'intensité est rendue variable au moyen d'un rhéostat. On nomme ainsi une résistance additionnelle, placée en série dans le circuit d'utilisation et dont on peut faire changer la valeur soit par curseur, soit par commutateur à plots. On utilise également un montage mixte : les grosses variations étant obtenues par un commutateur à plots, les réglages précis au moyen d'un curseur. La valeur de cette résistance dépend de la variation de puissance calorifique désirée. Soit P la puissance calorifique obtenue par l'emploi d'une résistance R et d'une différence de potentiel E . L'intensité I du courant traversant cette résistance est donnée par la loi d'OHM $E = IR$ et d'après la loi de JOULE on peut écrire $P = \frac{R I^2}{J}$. Si la puissance calorifique désirée est n fois plus petite elle sera égale à $\frac{R I^2}{J n}$ et comme R ne change pas, l'intensité i qui fournira cette puissance sera telle que $i^2 = \frac{I^2}{n}$ ou $i = \frac{I}{\sqrt{n}}$ (1). Si r est la valeur de la résistance du rhéostat la loi d'Ohm donne dans ce cas :

$$E = (R + r) i = (R + r) \frac{I}{\sqrt{n}}$$

$$\text{D'où l'on tire } r = \frac{E \sqrt{n}}{I} - R = R (\sqrt{n} - 1) \quad (2).$$

Les valeurs de I et de r ainsi calculées permettent de déterminer le diamètre et la longueur du fil qui constituera le rhéostat en se basant sur des tables établies pour cet usage.

Enfin, on peut agir sur la résistance en associant plusieurs résistances chauffantes. Leur groupement en série, en parallèle ou en montage mixte se prête à de multiples combinaisons. C'est ainsi que 2 résistances égales permettent d'obtenir des puissances calorifiques double ou moitié de celles fournies par une seule résistance; 3 résistances égales sont susceptibles de produire des puissances égales au $1/3$, au $2/3$, au double et au triple de la puissance obtenue par l'emploi d'une seule. Si on utilise des résistances de valeurs différentes, on aura à sa disposition 4 allures de chauffe pour 2 résistances et quatorze pour 3.

Les puissances calorifiques utiles sont, nous l'avons vu, de deux sortes :

1° Celles qui correspondent au chauffage proprement dit de l'enceinte. Elles dépendent de la masse et de la chaleur spécifique du fluide à échauffer et de la vitesse à laquelle on veut effectuer le chauffage. Soit M la masse du fluide, c sa chaleur spécifique, t le nombre de degré dont on veut élever la température, T le temps de la durée du chauffage, R le rendement de la source calorifique, on aura, en négligeant les calories servant à élever la température du récipient.

$$\text{Puissance calorifique} = \frac{M \times c \times t}{R \times T}$$

2° Celles qui servent au maintien de la température. Elles sont proportionnelles aux pertes et peuvent être déterminées expérimentalement. Leurs valeurs extrêmes seront fonction de l'importance et de l'influence des variations thermiques externes sur l'enceinte.

On est donc amené à utiliser plusieurs allures de chauffe ainsi que l'ont fait de nombreux expérimentateurs, RAWLING (11) en particulier.

11. RAWLING (S. O.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1922, **41**, 250 T. /251 T.

II. — ENCEINTES

A. — Généralités.

Nous voici en possession d'une source de chaleur utilisable. Avant de commencer l'étude de son emploi rationnel; nous allons rappeler brièvement les modes de transmission de la chaleur.

La chaleur se transmet par conduction, par convection, par rayonnement.

A. — Par conduction, le transport de calories s'effectue sans déplacement relatif des molécules. C'est ce qui se passe en général dans le cas de corps solides. Il est proportionnel au *coefficient de conductibilité*, spécifique pour chaque corps et variant dans le même sens que la température. Ce coefficient, élevé pour les métaux, est faible pour les liquides et très petit pour les gaz. Celui de l'air, par exemple, est 20 fois plus petit que celui de l'eau et 16.000 fois moindre que celui de l'argent à la température de 20°. Pour les gaz, il est indépendant de la pression mais varie suivant la composition chimique. C'est ainsi que celui de l'hydrogène est environ 12 fois plus grand que celui de l'anhydride carbonique. On désigne ce coefficient par la lettre χ et la loi qui régit les transmissions de chaleur par conduction s'écrit sous la forme :

$$Q \text{ calories} = \frac{\theta \text{ Scm}^2 (t - t') \chi}{e}$$

Dans cette formule Q représente le nombre de calories transmises pendant un temps θ secondes par une surface S d'une matière ayant une épaisseur e et un coefficient de conductibilité χ lorsque la différence de température de chaque côté de la matière est $(t - t')$.

B. — Par convection, la chaleur se transmet par les molécules de fluide en mouvement. On distingue la convection naturelle, causée par la différence de densité due à la différence de température, et la convection artificielle provoquée par un mouvement mécanique. Ce phénomène est très complexe. On admet actuellement qu'il comporte 3 phases :

1° Cession de chaleur de la paroi solide aux molécules fluides en contact immédiat;

2° Passage de la chaleur à travers cette couche limite;

3° Transmission de la chaleur à la masse du fluide.

La première phase s'accomplit sans résistance.

La seconde est très difficile car la chaleur se transmet uniquement par conduction par suite des effets capillaires qui s'opposent à la formation de courants de convection.

La troisième enfin est variable, suivant l'agitation du milieu. Si le régime est laminaire (sans tourbillon) l'échange de chaleur est très lent et ne dépasse guère celui dû à la conductibilité. Au contraire, au delà d'une certaine agitation, dite agitation limite, il se produit dans le fluide une certaine « turbulence » qui rend l'échange calorifique presque instantané. L'expérience a montré que, dans ce cas, le coefficient de convection est d'autant plus élevé, que l'épaisseur de la couche limite est faible. On diminue cette épaisseur en employant des surfaces de contact lisses, en augmentant l'agitation ou en réduisant la densité ou la viscosité du fluide. Le coefficient de convection C qui régit les échanges par convection selon une formule analogue à la transmission par conduction peut se calculer au moyen de la formule suivante :

$$C = \sqrt{\frac{L c d v}{\pi l}} + \left(\frac{1}{2} r c d v\right) D^{0,25}$$

Dans cette formule L , c , d , représentent respectivement le coefficient de conductibilité, la chaleur spécifique et la densité du fluide, D et l le diamètre et la hauteur du récipient, v et r des coefficients d'agitation et de rugosité de paroi (KÖHLER) (12).

C. — La transmission par rayonnement diffère totalement des précédentes. On peut l'envisager comme une forme de mouvement vibratoire de l'éther, suivant les mêmes lois que les ondes lumineuses ou électriques. On admet qu'à la surface émettrice l'énergie calorifique se transforme en énergie rayonnante capable, au contact de certaines substances dites absorbantes, de se retransformer en énergie calorifique. La quantité de chaleur émise ou absorbée, par un corps, dépend de sa surface, de sa nature et de sa température. Elle est proportionnelle à la surface du corps. Elle varie également suivant « le pouvoir émissif » obtenu par comparaison avec le « corps noir ». Enfin la loi de STEPHAN nous apprend que la quantité de chaleur rayonnée est proportionnelle à la 4^e puissance de la température absolue.

12. KÖHLER (L.). — Bull. Assoc. Franc. de propriétaires d'appareils à vapeur, n° 45, juillet 1931, p. 1.

Nous allons maintenant étudier la nature des échanges thermiques qui s'effectuent entre la source de chaleur, le fluide, le récipient, l'air ambiant, lorsque l'on se sert d'une résistance électrique, placée à l'intérieur de l'enceinte. Nous avons vu que la chaleur se développait dans un fil résistant. Si le fluide à chauffer est mauvais conducteur de l'électricité, ce fil peut être placé directement dans le milieu et dans ce cas l'échange de chaleur est instantané. Dans le cas contraire, il faut isoler électriquement le fil chauffant du fluide par l'intermédiaire d'un manchon étanche. En vue de faciliter l'échange thermique qui ne peut se faire que par conduction entre le fil et le manchon, on réduira le plus possible l'espace résistance-manchon dont la paroi devra être très mince, très conductrice et douée d'un fort pouvoir émissif. Si ce manchon est métallique, il sera isolé électriquement de la résistance chauffante. La transmission de la chaleur de la source au fluide se fera très lentement, par conduction seule. Pour l'accélérer on facilitera la transmission par convection en employant un manchon lisse à grande surface, et en entretenant dans le fluide une agitation supérieure à l'agitation limite. Au contraire, il y a intérêt, pour se soustraire aux influences thermiques externes, à limiter les échanges de l'enceinte avec l'ambiance. Dans ce but, on diminuera le coefficient de convection en employant une paroi interne du récipient rugueuse et peu absorbante. La matière constituant la paroi sera aussi épaisse et aussi peu conductrice que l'expérience le permettra. Enfin la partie externe sera rugueuse et douée d'un faible pouvoir émissif.

Afin d'illustrer ces considérations théoriques nous allons, par quelques exemples montrer comment ces différents facteurs sont susceptibles d'agir sur la courbe de régulation représentant les variations de température en fonction du temps. La courbe idéale que l'on s'efforce d'obtenir est une droite parallèle à l'axe des temps. On obtient toujours une courbe à allure sinusoïdale présentant d'abord l'aspect représentatif d'un mouvement périodique amorti. Puis lorsque le régime de fonctionnement s'est établi, la courbe ressemble à celle qui traduit un mouvement périodique entretenu.

Le but poursuivi est d'obtenir rapidement un régime de fonctionnement stable et de réduire le plus possible l'amplitude des oscillations thermiques.

B. — Influence de la puissance calorifique.

LALANDE (13) dans un travail récent a montré l'influence de l'existence et de la nature du manchon entourant la résistance. Il donne une courbe permettant de déterminer approximativement l'écart produit sur les températures extrêmes par l'emploi de ces résistances, en fonction de la puissance calorifique utilisée.

Cette influence est d'autant plus grande que la puissance calorifique est plus considérable ou, ce qui revient au même, que l'intensité du courant traversant la résistance est plus élevée. Nous avons personnellement constaté que pour une résistance travaillant dans des conditions expérimentales déterminées, l'écart de température a été de $0^{\circ}5$ pour une intensité de 3,3 ampères alors qu'une intensité de 1,65 ampères n'a produit qu'une différence de $0^{\circ}05$. Dans une autre série d'expériences nous avons noté des écarts de $0^{\circ}3$ et $0^{\circ}075$ pour des intensités respectivement égales à 1,65 ampères et 1,2 ampères.

D'autre part, dans un ensemble thermostatique que nous avons étudié, nous avons constaté dans la courbe de régulation une pente ascendante de $1^{\circ}7$ minute pour une intensité de chauffage de 3,3 amp. Cette même pente n'était que de $0^{\circ}2$ minute pour une intensité de 1,65 amp.

Nous voyons ainsi l'importance du choix de la résistance et de la puissance calorifique dans le problème de la régulation.

Voyons maintenant l'influence de l'agitation.

C. — Influence de l'agitation.

LALANDE (13) a montré que, au-dessus d'une certaine agitation, la température du fluide est uniforme à 1 ou 2 centièmes de degré près. Nous avons cherché l'influence exercée par l'agitation, sur la courbe de régulation.

L'expérience suivante nous montre l'importance de l'agitation du fluide chauffé. Une enceinte constituée par un vase de Dewar contient de l'eau chauffée par une résistance électrique. On emploie un régula-

13. LALANDE (A.). — Contribution à l'étude des équilibres physico-chimiques à basse température (Thèse de doctorat ès sciences. Université de Paris, 19 avril 1934).

teur sensible à grande surface de contact. L'agitation du milieu peut être obtenue au moyen d'une hélice actionnée par un moteur électrique. On réalise ainsi un dispositif répondant à de très bonnes conditions de transmission de chaleur. La courbe de régulation a été tracée pendant une heure environ avec et sans agitation en maintenant constante l'intensité du courant. Le thermomètre était placé dans les deux cas au même endroit à égale distance de la résistance et de la paroi et à mi-hauteur afin d'enregistrer une température moyenne dans le cas d'absence d'agitation. Nous avons obtenu les chiffres suivants, qui nous ont permis de tracer les courbes (fig. 3) :

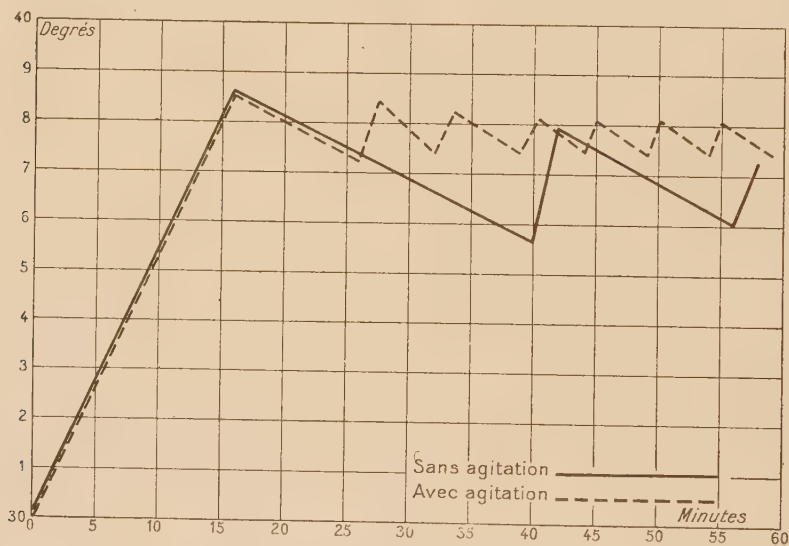


FIG. 3. — Influence de l'agitation.

SANS	T°	30	38,6	35,6	37,9	36	37,3			
AGITATION	t. min.	0	15	40	42	56	58			
AVEC	T°	30	38,5	37,2	38,4	37,4	38,2	37,4	38,1	37,4
AGITATION	t. min.	0	15	26	27,5	32	33,5	39	40,25	44
	T°	38,1	37,4	38,1	37,4	38,1	37,4			
	t. min.	45	49	50	54	55	59			

L'examen de ces courbes met en évidence le gros avantage qu'apporte l'agitation. Nous voyons en effet que pour une même

différence entre la température ambiante et la température à stabiliser (réduite volontairement à quelques degrés, pour diminuer le temps d'expérience afin d'être placé dans des conditions d'ambiance aussi identiques que possible) le régime régulier de variation de température est atteint au bout de 44 minutes lorsque l'on augmente la transmission par convection au moyen d'agitation mécanique, tandis que, au bout d'une heure les écarts notés lors de l'expérience sans agitation sont encore considérables en amplitude et en durée. Nous avons prolongé pendant six heures cette dernière expérience et au bout de ce temps nous avons observé un écart entre les températures maxima et minima de 1°5 deux fois plus considérable que l'écart de régime 0°7 obtenu au bout de 44 minutes avec agitation du milieu.

La production d'une même turbulence peut s'obtenir de différentes façons : soit au moyen d'hélices à larges pales tournant lentement (c'est le dispositif préconisé par LECOMTE DU NOUY) (14), soit par des petites hélices tournant à grande vitesse. Chacun de ces procédés présente des avantages et des inconvénients; le premier permet un brassage régulier sans vibration, le second assure un brassage énergique sous un faible encombrement. Les conditions expérimentales serviront de guide dans ce choix.

D. — Influence de l'isolement.

Voyons maintenant l'importance de l'isolement. Nous avons, dans ce but, réalisé la série d'expériences suivante. Nous avons construit la courbe de refroidissement de plusieurs enceintes de mêmes dimensions mais d'isolement variable. Nous avons utilisé des récipients cylindriques de 8 centimètres de diamètre contenant 600 grammes d'eau. L'un d'entre eux était en cuivre de 0 mm. 5 d'épaisseur, l'autre en Pyrex de 2 millimètres; le dernier était constitué par un vase de Dewar. La température ambiante étant de 17° nous avons porté l'eau contenue dans ces différentes enceintes à 70° et nous avons noté les températures en fonction du temps à partir de 67°. Nous avons obtenu les chiffres suivants qui nous ont permis de dresser les courbes (fig. 4) :

14. LECOMTE DU NOUY (P.). — Méthodes Physiques en biologie et en médecine 1933. Baillièrè, Paris.

TEMPS EN MINUTES	CUIVRE	PYREX	DEWAR
0	67°	67°	67°
5	60°5	62°2	
10	55°4	59°	
15	51°8	55°8	
20	48°5	52°5	
25	45°6	49°8	
30	43°2	47°3	66°
35	41°	45°2	
40	39°2	43°4	
50	36°	40°4	
60	33°6	37°6	65°
70	31°7	35°5	
80	30°	33°6	
90	28°6	32°	64°
100	27°4	30°5	
110	26°6	29°4	
120	25°6	28°1	63°
130	25°	27°1	
140	24°4	26°4	
150	23°8	25°6	62°
160	23°4	25°	
170	23°	24°5	
180	22°7	24°1	61°
190	22°4	23°6	
200	22°1	23°2	

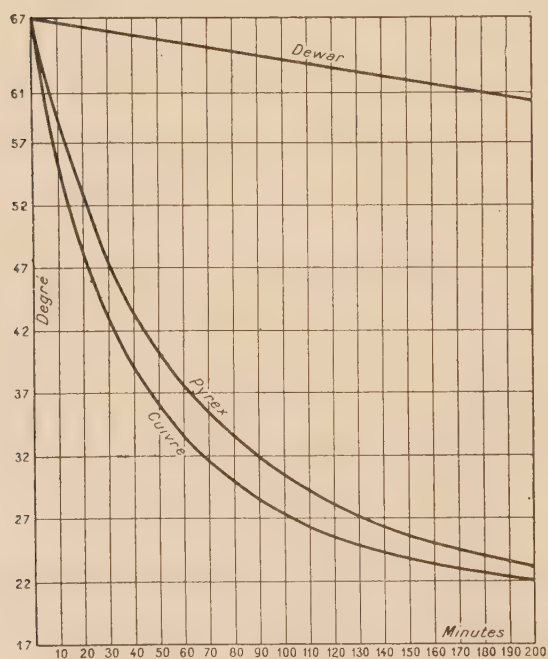


FIG. 4. — Influence de l'isolement.

L'étude du refroidissement du vase de Dewar a été continuée pendant trente heures jusqu'à l'obtention d'une température de 37° et les résultats obtenus nous ont montré que la baisse de température s'effectuait sensiblement à la vitesse de 1° par trente minutes.

Ces résultats nous ont permis de dresser le tableau suivant qui nous montre la valeur des chutes de températures minutes des trois enceintes considérées pour des différences de températures de 10°, 20°, 30°, 40° et 50° avec l'ambiance.

CHUTE EN DEGRÉ MINUTES POUR UN ÉCART DE	NATURE DE L'ENCEINTE		
	CUIVRE	PYREX	DEWAR
10°	0,1	0,08	—
20°	0,31	0,26	0,024
30°	0,58	0,40	0,028
40°	0,90	0,66	0,03
50°	1,3	0,96	0,03

Ces chiffres, conformes à la théorie, permettent de nous rendre compte dans quelles mesures, l'isolement limite les perturbations apportées dans la régulation par les variations de la température extérieure. Nous voyons ainsi que plus l'isolement est parfait, moins le régime d'entretien est influencé puisque la variation des pertes est moins importante pour un même écart de température. Enfin à isolement égal, l'inclinaison de la pente température-temps est d'autant plus accentuée que la température de l'enceinte s'écarte de celle de l'ambiance. Il y aura donc intérêt à réaliser le meilleur isolement compatible avec les conditions expérimentales. A cet effet, on emploiera le plus souvent possible des vases de Dewar qui réalisent un des meilleurs isolement sous un volume réduit. L'emploi de vases transparents permet de suivre les phénomènes à l'intérieur de l'enceinte, ce qui n'est possible avec les autres isolements qu'en ménageant des ouvertures vitrées, souvent difficiles à réaliser. Voici comment plusieurs expérimentateurs ont réalisé des enceintes thermostatiques en se basant sur les principes que nous venons d'exposer.

E. — Quelques réalisations.

L'étuve de D'ARSONVAL (15) comporte un chauffage par l'air chaud circulant dans des tubes traversant l'étuve. Elle est très soigneusement

15. ADNET. — Notice 1900. *Nouveautés chimiques*, 1901, p. 305.

calorifugée. Destinée aux recherches bactériologiques, le brassage énergétique de l'air intérieur n'y est pas recommandé. Aussi l'auteur pour favoriser l'échange rapide de calories a augmenté considérablement la surface de contact de la source chauffante et réparti son effet dans toute la masse du fluide en faisant circuler l'air chaud, véhicule de calories, dans de nombreux tubes judicieusement disposés. Ce dispositif encore employé de nos jours réalisait au point de vue de la régularité de température une amélioration considérable sur les dispositifs à chauffage extérieur à transmission par la paroi, dans lesquelles l'équilibre thermique est très long à obtenir.

Pour comparer des thermomètres ou des couples thermoélectriques, J.-R. CONNELLY (16) propose l'emploi d'un grand volume de liquide (huile pour températures supérieures à 100°) animé d'un mouvement rapide au moyen d'une pompe rotative.

Pour effectuer des mesures polarimétriques à température constante L. RAMBERG et J.-F. HEUBERGER (17) ont imaginé l'ensemble thermostatique suivant :

Une cuve en laiton isolée de l'air ambiant par du feutre porte deux viseurs latéraux et contient un liquide inactif (pétrole ou tétraline). Un agitateur rotatif assure la répartition homogène des calories. Une gouttière en laiton immergée dans le liquide supporte le tube polarimétrique qui dans le cas présent est un tube de Landolt. Ce dispositif peut être utilisé pour un ou plusieurs tubes polarimétriques.

Un ensemble thermostatique particulièrement bien étudié est celui présenté par J. MENDELEIEFF (18). Il comprend un récipient cylindrique en laiton soigneusement calorifugé ayant un diamètre et une hauteur de 20 centimètres. Son volume intérieur est divisé en deux parties égales par une cloison cylindrique ne touchant pas le fond et n'atteignant pas le niveau supérieur du liquide. Une hélice placée au fond de la partie centrale produit une circulation continue du liquide qui remplit le récipient. Le chauffage est assuré par une résistance électrique placée au fond près de la cloison médiane. Un régulateur sensible et sans inertie complète l'ensemble. L'auteur assure obtenir une constance de l'ordre du millième de degré.

16. CONNELLY (J. R.). — *Power*, 1931, **74**, p. 230-231.

17. RAMBERG (L.) et HEUBERGER (J. F.). — *Svensk Khem. Tidshr.*, 1928, **40**, 227/229 et *Central Blatt. Zuck. Ind.*, 1928, **36**, 1326/1327.

18. MENDELEIEFF (J. J.). — *Prikladn. Khim*, 1930, **3**, p. 759/764.

Le thermostat à air proposé par W. H. S. VERNON (19) est de construction relativement simple. Il a été conçu par l'auteur pour l'étude de la corrosion atmosphérique à température constante mais peut être utilisé dans beaucoup d'autres cas. L'auteur a obtenu avec ce dispositif des différences de température, au même instant, en différents points, inférieure à 0°015 et une différence de température en un point donné de moins de 0°005 pendant deux semaines. L'ouverture d'une des portes pendant quatre minutes ne cause qu'une chute de température de 0°03. Les conditions de marche sont susceptibles de satisfaire à de nombreuses mesures expérimentales. Le dispositif se compose d'une enceinte de 2 m. 50 de long sur 1 m. 10 de large et 1 mètre de hauteur. L'isolement est réalisé par une épaisseur de 5 centimètres de liège comprimé, recouvert de tissu d'amiante. Deux portes à guillotine à double paroi de verre permettent l'introduction d'objets dans le thermostat ainsi que l'observation des phénomènes qui s'y effectuent. Deux étagères placées à 10 centimètres du fond sont destinées à recevoir les corps en expérience. Elles sont situées de part et d'autre d'une table centrale assez haute portant les régulateurs. Ces derniers sont au nombre de deux. L'un commande un régime de chauffe rapide destiné à compenser les pertes de chaleur causées par l'ouverture d'une porte, l'autre agit sur le régime d'entretien. Le chauffage est assuré sur une grande surface par des lampes à incandescence disposées en rampe à la partie supérieure et à une certaine distance des parois latérales. Deux ventilateurs placés face à face assurent un brassage rationnel de l'atmosphère.

Dans le même ordre d'idées U. EVANS (20) décrit un thermostat isolé de l'extérieur par des plaques de liège enchassées dans du bois. L'air chauffé par une résistance électrique est amené au moyen d'un ventilateur à suivre un chemin compliqué autour d'un espace central où l'on place les corps en expérience au moyen de portes garnies de liège dont la partie supérieure est munie d'un regard servant à l'observation de l'intérieur de l'enceinte.

Ces dispositifs sont conçus d'après les principes qui ont fait l'objet de ce chapitre. Ils diffèrent notablement des appareils que l'on rencontre couramment dans les laboratoires. La plupart de ces derniers sont basés sur une autre conception de la transmission de chaleur. La méthode utilisée dans ce cas consiste à chauffer lentement un récipient à paroi

19. VERNON (W. H. S.). — *Trans. Farad. Soc.*, 1931, **27**, 241/247.

20. EVANS (U.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1931, **50**, 66/67.

épaisse, peu conducteur de la chaleur et susceptible par suite de la grande chaleur spécifique des matériaux utilisés, d'emmagasiner une grande quantité de calories. Si les échanges de chaleur sont alors lents dans le sens air chaud-enceinte, ils le sont également dans le sens enceinte-ambiance. De sorte que de brusques variations de régime, soit dans la source chauffante, soit dans l'air extérieur, ont une action très affaiblie et très retardée sur le milieu interne. On peut employer ces dispositifs lorsque la température doit rester constante pendant une très longue durée durant laquelle les conditions de chauffage et de rayonnement sont susceptibles de varier dans de grandes limites. Ils n'utilisent qu'une faible partie des calories produites, sont par suite d'un fonctionnement coûteux et mettent beaucoup de temps à atteindre leur régime régulier. Plusieurs jours de réglage sont parfois nécessaires. C'est pourquoi on ne peut que difficilement envisager leur emploi au Laboratoire pour l'étude de l'influence de la variation de température sur des phénomènes. De ce fait, ils ne permettent pas de résoudre tous les problèmes de régulation que le chercheur peut être amené à envisager. Nous ne décrivons pas les étuves et bains-maries construits sur ces principes. Ils sont d'un usage courant dans les laboratoires de bactériologie et de chimie pour l'obtention de certaines températures fixes (étuves de Wiesneck, de Gay-Lussac) à 37°, à 110°, qui répondent au but qui leur est assigné. Nous signalerons, basé sur ce principe, l'appareil à température constante de L.-M. PIDGEON et A.-C. EGERTON (21) dans lequel le volant calorifique est assuré par une grande quantité de mercure servant également à la régulation. Ces appareils ne peuvent être utilisés que pour l'obtention de températures constantes à 1 ou 2° près.

F. — Conclusions.

Il résulte de l'étude que nous venons de faire que la source de chaleur la plus favorable pour la thermoregulation est le chauffage électrique.

On devra, pour obtenir de bons résultats utiliser la plus faible puissance calorifique possible, réaliser une agitation efficace et un isolement aussi bon que le permettront les conditions expérimentales.

21. PIDGEON (L. M.) et EGERTON (A. C.). — *J. Sc. Ins.*, 1931, **8**, 268/269.

CHAPITRE II

LES RÉGULATEURS DE TEMPÉRATURE

I. — RÉGULATEURS EXISTANTS

A. — Généralités.

On désigne sous ce nom les appareils susceptibles, sous l'action de la température, de faire varier la puissance calorifique de la source chauffante afin de maintenir le niveau thermique de l'enceinte à une valeur aussi constante que possible. Ces régulateurs sont donc basés sur la variation avec la température de certaines propriétés physiques. Dans ce chapitre nous étudierons ces propriétés et les applications qui en ont été faites pour la construction des régulateurs. Nous décrirons les appareils réalisés; nous en ferons la critique et, comme conclusion, nous envisagerons la construction d'un régulateur universel susceptible dans beaucoup de cas de répondre aux besoins de l'expérimentation.

Quelles sont les qualités demandées à un régulateur? L'étude des échanges thermiques, faite au précédent chapitre nous a montré qu'un régulateur doit, pour être d'un emploi pratique :

- 1° Atteindre rapidement son équilibre thermique;
- 2° Suivre aussi fidèlement et rapidement que possible les variations de température de l'enceinte;
- 3° Avoir un fonctionnement précis indépendant des variations physiques de l'ambiance;
- 4° Pouvoir servir sur une grande échelle de température;
- 5° Ne pas nécessiter l'emploi d'un matériel coûteux ou fragile.

C'est sur ces différents points que portera notre étude critique des appareils actuellement utilisés.

On peut classer les propriétés physiques, variant avec la température, en propriétés moléculaires, optiques et électriques. Notons comme susceptibles de servir de base à la construction d'un régulateur, parmi les premières, la densité, la dilatation, la tension de vapeur; parmi

les secondes, l'indice de réfraction et le pouvoir rotatoire; parmi les dernières la résistivité de la différence de potentiel des couples thermo-électriques.

B. — Propriétés moléculaires.

A. — DENSITÉ.

Peu de régulateurs sont fondés sur la variation de la densité avec la température. Dans nos recherches bibliographiques nous n'avons trouvé dans cet ordre d'idées que le régulateur de MENZEL (22), constitué par une sorte d'aréomètre commandant l'ouverture ou la fermeture d'une circulation d'air chaud. Il semble que, sur ce principe, on pourrait réaliser des régulateurs électriques constitués par des aréomètres agissant par leur partie supérieure sur un contact électrique; mais la nécessité d'agiter le liquide thermostatique rend leur utilisation fort délicate de telle sorte qu'il n'y a pas beaucoup d'intérêt à se servir des variations de cette propriété.

B. — DILATATION.

C'est à la dilatation que de nombreux inventeurs se sont adressés pour la réalisation de régulateurs. Nous envisagerons l'emploi des dilatations linéaire, superficielle et cubique.

1^o Dilatation linéaire.

La longueur d'une tige solide à t° est donnée par la formule :

$$L_t = L_0 (1 + \alpha t)$$

α est un coefficient particulier à chaque solide.

En consultant les tables on constate que ce coefficient a pour les métaux usuels des valeurs variant de 9.10^{-6} à 30.10^{-6} .

¹Dans le cas des alliages, le coefficient de dilatation est variable suivant la composition. Il est, en général, compris entre les coefficients de dilatation des métaux purs. Cependant, pour des combinaisons définies correspondant à ce qu'on a appelé des solutions solides, ce

22. MENZEL (G. W.). — *Chem. Repert.* (*Supplément Chem. Zeit*), 1896, **11**, 89.

coefficient peut être plus grand ou plus petit que ceux des métaux constituant l'alliage. Enfin, certains alliages, tel le métal Invar (0,36 Ni, 0,002 C, 0,638 Fe), le coefficient de dilatation est nul.

Les régulateurs basés sur la dilatation des solides peuvent se diviser en deux groupes :

Les uns appelés bi-métalliques quoique souvent les matériaux employés ne soient pas des métaux, désignés aussi parfois sous le terme de régulateurs différentiels, reposent sur la différence de dilatation éprouvée par deux substances de nature différente.

Les autres, les régulateurs à dilatation de solides proprement dits ne possèdent qu'un seul constituant actif.

Les plus fréquemment utilisés au Laboratoire sont du premier type. Ils sont, le plus souvent, basés sur le principe suivant : on fixe solidement à une extrémité deux substances, l'une très dilatable, l'autre peu, et l'on fait agir leur différence de longueur sur la source de chaleur par l'intermédiaire d'un bras de levier. Dans d'autres cas les deux métaux sont soudés sur toute leur longueur et la dilatation de la tige hétérogène ainsi obtenue amène la torsion de celle-ci. Cette torsion est alors utilisée pour actionner l'organe régulateur. Cette action peut être encore amplifiée en donnant à la tige ainsi obtenue une forme spiralee.

L'examen des dispositifs utilisés va nous permettre d'étudier les réalisations proposées.

En 1900 ADNET (23) décrit un régulateur bi-métallique de forme spéciale destinée à régler la température d'une étuve à 38°. Les deux constituants sont le zinc et l'acier.

Puis, en 1902 LEQUEUX (24), désireux d'atteindre des températures plus élevées dut abandonner le zinc dont la texture moléculaire se modifiait vers 100°. Il utilisa alors, comme métal dilatable le laiton qui permet d'atteindre un maximum de 500°. Pour remédier au coefficient de dilatation relativement faible du laiton, il employa de l'acier au nickel, à coefficient de dilatation linéaire presque nul.

L'amplification du mouvement ne s'obtient plus ici par flexion, mais par bras de levier.

L'appareil imaginé par FRANZ HUGERSHOFF (25) est basé sur le même principe.

23. ADNET. — Notice 1900. *Nouveautés Chimiques*, 1901, p. 303.

24. LEQUEUX. — Notice, *Nouveautés Chimiques*, 1902, p. 75.

25. HUGERSHOFF (S.). — *Zeits. für Chem. Apparenkunde*, n° 4, 1905, 101.

En 1913 ADNET (26) emploie comme matière dilatable le cuivre et comme matière à faible dilatation le quartz. Il adopte la forme tubulaire et l'amplification par bras de levier. Le réglage obtenu est à 2° près et l'équilibre s'établit après deux ou trois heures.

La forme spiralée est employée dans le régulateur d'étuve au pétrole décrit dans le *Vereignite Fabriken für Laboratoriums Bedarf Prospekt* (1912) (27). Il actionne un couvercle horizontal, ouvrant plus ou moins la cheminée, dans lequel pénètre le verre de la lampe.

Dans le *B. F.*, n° 578-260 DEMOLT et MULLER (28) décrivent un régulateur électrique basé sur ce principe. La lame bi-métallique agit par l'intermédiaire d'une tige sur un contact dont l'existence au repos est assurée par aimantation.

D. H. BLACK (29) présente un régulateur destiné au chauffage électrique constitué par une hélice dont une extrémité est fixée à un axe central terminé par un écrou qui porte un levier ouvrant ou fermant le circuit de chauffage. La torsion de l'hélice, due à la différence de dilatation des deux métaux qui la constituent, actionne ce levier. L'auteur, qui emploie un condensateur pour éviter les étincelles, déclare obtenir le réglage à 0°04 près, sans préciser toutefois, la nature des deux métaux employés.

En résumé, ces régulateurs très robustes, sont très utilisés mais, si leur sensibilité relativement faible est cependant suffisante pour résoudre les problèmes courants de la régulation, leur emploi ne peut être envisagé dès que la sensibilité désirée dépasse une certaine valeur. Enfin, leur usage semble limité au réglage de température de gaz secs (couples).

Les régulateurs utilisant la dilatation linéaire sont réalisés de la même façon que les ampèremètres thermiques. Le fil dilatable tendu soit par un ressort, soit par un poids, s'enroule à une de ses extrémités sur une poulie munie d'une aiguille établissant un contact. Ce dispositif a été utilisé dans le régulateur à fil dilatable CHENEVARD (30). Certains expérimentateurs utilisent la flèche produite par la dilatation pour

26. ADNET. — Notice. *Nouveautés Chimiques*, 1913, p. 82.

27. *Vereignite Fabriken für Laboratoriums Bedarf Prospekt*, n° 138, 1912, p. 2.

28. DEMOLT (E.) et MULLER (M.). — *B. F.*, n° 578, 260.

29. BLACK (D. H.). — *J. Sc. Inst.*, 1928, 5, 376/377.

30. CHENEVARD (P.). — Analyse dilatométrique des matériaux, 1929, Dunod, Paris.

actionner soit une aiguille comme dans le cas précédent, soit un contacteur à mercure contenu dans une petite ampoule.

En résumé, ces appareils sont en général, peu sensibles, robustes, susceptibles de prendre rapidement leur équilibre thermique et de suivre les variations de température. Leur fonctionnement indépendant des variations atmosphériques est peu précis par suite des nombreux organes mécaniques nécessaires pour l'obtention d'une sensibilité acceptable. Dans le cas d'applications au chauffage électrique, il faut redouter l'amorçage d'arc qui, volatilisant une partie du métal, dérègle l'appareil. D'autre part, l'oxydation due aux fréquentes étincelles de contact et de rupture est capable d'empêcher rapidement le bon fonctionnement de ces instruments qui ont également, l'inconvénient de ne pouvoir servir que dans un milieu gazeux et sec en raison des couples qui pourraient se produire au point de contact des deux métaux. Enfin, ils sont peu coûteux et, par construction il est possible de leur donner la possibilité de servir sur une échelle de température étendue.

2° *Dilatation superficielle.*

On sait qu'une surface subit avec la température une variation donnée par la formule $St = So (1 + \sigma t)$ et le calcul montre que le coefficient de dilatation superficielle est le double du coefficient de dilatation linéaire. Les régulateurs réalisés sur ce principe sont constitués par une plaque métallique sur laquelle on a soudé ou déposé électrolytiquement une certaine épaisseur d'un autre métal possédant un coefficient de dilatation différent. Une légère variation de température amène la torsion de cette surface, torsion dont on se sert pour fermer ou interrompre le circuit.

La précision obtenue étant de l'ordre de plusieurs degrés, nous ne retiendrons pas ce dispositif utilisé dans certains appareils ménagers comme susceptible d'être employé dans la présente étude.

3° *Dilatation cubique.*

a) *Dilatation des liquides.* — Le volume V occupé par un liquide à une température t est donné par la formule $V = Vo (1 + at + bt^2 + ct^3)$ a , b et c étant des coefficients spécifiques pour chaque liquide. Dans l'application envisagée seule la dilatation apparente, c'est-à-dire la dilatation réelle du liquide, diminuée de la dilatation de son contenant,

pourra être utilisée. On aura donc intérêt à prendre un récipient construit en matière à faible coefficient de dilatation. Les liquides ont un coefficient de dilatation de quelques millièmes. Parmi les liquides usuels, les plus intéressants sont :

	a	T. F.	T. E.
Toluène	0,0011	— 95°	+ 110°
Alcool méthylique.	0,001199	— 95°	+ 64°
Benzène	0,001237	+ 5°	+ 80°
Sulfure de carbone.	0,001218	— 113°	+ 46°
Chlorure d'amyie	0,001208		+ 107°
Chloroforme.	0,001273		+ 61°
Oxyde de propyle	0,001354		+ 90°
Bromure d'éthyle	0,001418	— 118°	+ 38°
Oxyde d'isopropyle	0,001452		+ 69°
Acétone	0,001487	95°	+ 56°5
Oxyde d'éthyle	0,001653		+ 35°

Ces liquides doivent être utilisés pour régulariser les températures comprises entre leur point de fusion et leur point d'ébullition. Parmi les liquides les plus employés, le mercure dont la dilatation cubique réelle est 0,00018 tient pour cette raison une place importante : se solidifiant à — 39° il bout à + 357°. De plus, la propriété qu'il a d'être bon conducteur de l'électricité le fait employer dans maints régulateurs de chauffage électrique. Son faible coefficient de dilatation le fait parfois utiliser simultanément avec d'autres liquides plus dilatables.

Signalons l'emploi du toluène par W. H. SODEAU (31), HOUDARD (32), J. HUME (33) de l'acétone par MARIE et MARQUIS (34) et VILLIERS (35) (régulateur Régnier), de l'acétate d'amyie par les Frères LUMIÈRE (36).

Les récipients contenant le liquide doivent avoir une faible dilatation. Voici quelques chiffres concernant les corps susceptibles de constituer ces récipients :

-
31. SODEAU (W. H.). — *The Analyst*, 1905, **30**, 106.
 32. HOUDARD. — *Nouveautés Chimiques*, 1910, p. 39.
 33. HUME (J.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1924, **43**, 250 T/251 T.
 34. MARIE (C.) et MARQUIS (R.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1903-, **176**, 614.
 35. VILLIERS (A.). — *Bul. Sc. Ph.*, 1905, **12**, 9, 15.
 36. LUMIÈRE (L. et A.). — Notice Ducat. *Nouveautés Chimiques*, 1902, 71.

	<u>a</u>	<u>λ</u>
Verre	2584.10 ⁻⁸	0,0015
Flint	2435	0,0015
Verre de Thuringe	2814	0,0015
Aluminium.	7140	0,48
Cuivre.	5094	1,00
Fer	3684	0,20
Nickel.	3900	0,14
Platine	2721	0,190
Quartz	177	0,016
Porcelaine	326,5	0,0025
Pyrex.	1002,3	0,0027

Malgré son prix élevé, le quartz, par suite de sa haute résistivité électrique, de son faible coefficient de dilatation cubique et de sa conductibilité thermique relativement bonne, présente de gros avantages dans cette application. Les régulateurs basés sur cette propriété se présentent sous la forme d'un thermomètre de grande dimension, dont le mercure agit lorsqu'il atteint une certaine hauteur, sur la source calorifique (débit du gaz ou contact électrique).

b) *Dilatation des Gaz.* — La dilatation des gaz se fait suivant la loi de Gay-Lussac.

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t)$$

α étant un coefficient sensiblement égal à 1/273 soit 0,003663. Dans la réalité, chaque gaz a un coefficient légèrement différent, mais pour les gaz simples, la variation ne porte que sur la sixième décimale et, pour l'application pratique, l'approximation est suffisante. Comme dans le cas des liquides, il faut considérer comme seule utilisable la dilatation apparente et non la dilatation réelle. D'autre part, les gaz étant compressibles, il faut opérer soit à pression constante, et utiliser directement la dilatation, soit à volume constant et, dans ce cas se servir de l'augmentation de pression produite par la dilatation. A pression constante, la dilatation d'un gaz est environ trois fois plus forte que celle des liquides. Les gaz les plus employés dans les régulateurs sont l'azote et l'hydrogène. Les appareils réalisés agissent à volume constant; l'augmentation de pression agit sur le débit calorifique par l'intermédiaire de mercure contenu dans un tube en U. L'appareil de NEVEU (37) en est un exemple.

Ces régulateurs ont reçu de nombreuses modifications. Les uns

37. NEVEU (R.). — *Nouveautés Chimiques*, 1912, 59.

ont cherché à réaliser d'une manière pratique et stable, le réglage de la hauteur de la colonne de mercure; d'autres, se sont efforcés de remédier aux troubles de fonctionnement provenant de l'altération du mercure. En ce qui concerne les régulateurs destinés aux combustibles gazeux, certains expérimentateurs tels que STOCK (38), VILLIERS (35) ATKINSON (39) se sont attachés à éviter le contact du gaz avec le mercure, cause principale d'encrassement du capillaire. D'autres, comme BERLEMONT (40), FONTAINE (41) ont réalisé des dispositifs capables d'assurer le réglage précis et stable de la hauteur du mercure. Enfin, DUNNINGTON (42) et EPSTEIN (43) agissent sur la hauteur du tube adducteur de gaz.

Si nous examinons les différents régulateurs électriques proposés, nous constatons que les modifications apportées à l'appareil type ont cherché à combattre deux défauts de ces régulateurs :

1° L'ajustement difficile du niveau du mercure;

2° L'action de l'étincelle électrique sur le mercure.

Nous allons étudier quelques solutions proposées.

C. MARIE et R. MARQUIS (34) dans la réalisation d'un thermostat électrique, ont obtenu le réglage du niveau du mercure au moyen d'un dispositif ingénieux mais fragile.

FERGUSON (44) préconise dans son régulateur un système d'ajustement employant un tube plongeur qui fait varier le niveau du mercure et réalise le contact au moment où l'on obtient la température voulue.

A. B. HARVEY (45) décrit un régulateur électrique ayant les mêmes caractéristiques qu'un thermomètre de Beckmann, possédant un réservoir permettant de séparer le mercure en excès.

FRIEDRICHS (46) conseille pour le réglage de la hauteur du mercure, l'emploi d'une vis micrométrique dont la partie en contact

38. STOCK. — *Chem. Zeit.*, 1901, **25**, 545.

39. ATKINSON (H. M.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1920, **39**, 298 T.

40. BERLEMONT. — *Bul. Soc. Chim.*, 1895 (3), **13**, 228.

41. FONTAINE (E.). — *Ann. Chim. Anal.*, 1911, **16**, p. 52.

42. DUNNINGTON (F. P.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1895, **17**, 781.

43. EPSTEIN. — Notice Peters et Rost (Berlin), n° 33, janvier 1901, p. 10.

44. FERGUSON (J. B.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1918, **40**, 929/930.

45. HARVEY (A. B.). — *J. Biol. Chem.*, 1920, **41**, 9.

46. FRIEDRICHS (E.). — *Chem. Zeit.*, 1929, **53**, 480.

avec le mercure n'est pas filetée afin d'éviter le passage de gouttes de mercure le long du filet. Enfin, H. BRUNING (47) décrit un dispositif à double réglage l'un grossier, l'autre précis.

D'autres auteurs ont agi sur le réglage de la hauteur du contact. Parmi les principales réalisations basées sur ce principe, nous citerons celles de :

FREEMAN (48) dont le fil est commandé par glissière de vis sans fin.

BURREWORTH et A. D. DERRER SMITH (49) dans lequel le réglage se fait par vis.

Enfin, dans le cas de l'emploi de la dilatation de gaz, certains auteurs agissent sur le niveau du mercure en créant dans la branche libre un vide partiel. C'est le moyen utilisé dans le régulateur de COPPOK, COLVIN et J. HUME (50).

Voyons, maintenant, les moyens utilisés pour atténuer l'effet oxydant des étincelles de contact et de rupture à la surface du mercure. Les étincelles produisent rapidement une sorte de crasse non conductrice, s'accrochant au verre et rendant imprécis le fonctionnement du régulateur. Les modifications apportées dans ce but sont de deux sortes. Les premières substituent à l'air dans la partie libre du régulateur, un gaz non oxydant, hydrogène ou azote. Les réalisations de REGAUD et FOUILLAND (51) qui utilisent l'hydrogène, celles de RAMBERG (52) (hydrogène) de J. H. WING (53) (hydrogène) sont basées sur ce principe.

Les autres évitent le contact avec le mercure en disposant à la surface de celui-ci des flotteurs en matière conductrice venant en contact avec le fil d'arrivée du courant disposé en spirale.

C'est le cas des régulateurs imaginés par :

A. SIMON et O. FISCHER (54).

47. BRUNING (H.). — *Chem. Fabrik*, 1931, **4**, 17/19.

48. FREEMAN (N. H.). — E. P. 120.590.

49. BURREWORTH (E.) et DERRER SMITH (A. O.). — *J. Sc. Inst.*, 1930, **7**, 233.

50. COPPOK (J.B. M.), COLVIN et HUME (J.). — *Chemistry and Industry* 1932, **51**, 140.

51. REGAUD et FOUILLAND. — *Ann. Chim. Anal.*, 1909, **14**, 141.

52. RAMBERG (L.). — *Svensk. Khem. Tidskr.*, 1926, **38**, 94/95.

53. WING (J. H.). — *Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.)*, 1930, **2**, 196/197.

54. SIMON (A.) et FISCHER (O.). — *Z. anorg. allg. chem.*, 1927, **162**, 279/286.

P. RATH et A. SIMON (55).

КОРРОК, COLVIN et HUME (50).

L'emploi d'une couche isolante d'huile est également à rejeter par suite de la formation de mercure colloïdal rendant l'huile conductrice.

D'autres dispositifs ont pour but de diminuer les irrégularités dues à la présence de crasses à la surface du mercure.

Dans cet ordre d'idées, nous signalons celui dû à T. SLIGH (56) qui, modifiant le thermo-régulateur de GOUY, comporte un contact oscillant actionné par une came qui a pour but d'augmenter la sensibilité en diminuant l'effet capillaire. Un tel dispositif a permis à MENDELIEFF (18) de doubler la sensibilité de son ensemble thermostatique.

Des expériences personnelles nous ont montré que, plus l'intensité du courant coupé ou rétabli était grande, plus l'étincelle était chaude, ce qui entraînait une volatilisation de mercure et une formation de crasse plus importante. C'est ce qui a amené de nombreux expérimentateurs à utiliser des relais sensibles actionnés, soit par un courant auxiliaire produit par des piles, soit une dérivation du courant principal. Dès 1900, LEQUEUX construisit, sous la direction du Dr PAUL REGNARD (57), directeur de l'Institut agronomique, des étuves chauffées électriquement. (Relai 1500 ω , branché en dérivation, int. 0A04 — pétrole à la surface).

On a également cherché à diminuer les étincelles par l'emploi aux bornes des conducteurs d'arrivée et de départ du courant, de condensateurs de forte capacité (SCHENK (58)). Notons à ce sujet que ces dispositifs ne peuvent fonctionner que si l'on utilise du courant continu. L'emploi de redresseurs, comme ceux à l'oxyde de cuivre, peut rendre de grands services dans le cas à peu près général de l'usage du courant alternatif, car il permet l'utilisation de relai sensible, tout en conservant l'action absorbante du condensateur sur le courant du secteur.

Enfin, VAN CAMPEN (59) a résolu radicalement le problème en supprimant l'étincelle. Son dispositif est basé sur l'emploi d'une lampe triode. La grille de cette lampe est portée à un potentiel tel que le cou-

55. RATH (P.) et SIMON (A.). — *Chem. Fabrik*, 1932, **5**, 33.

56. SLIGH (T. S.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1920, **42**, 60/68.

57. REGNARD (P.). — Notice Lequeux, *Nouveautés Chimiques*, 1902-323.

58. SCHENK (P. W.). — *Ber. Deut. Chem. Ges.*, 1931, **64**, 368/370.

59. VAN CAMPEN (P.). — *L. Elektroch* 1929, **35**, 265/266.

rant plaque soit nul. Le contact du mercure avec la pointe rend la grille moins négative. Les électrons sont alors attirés par la plaque. Il en résulte un courant anodique qui, traversant les spires d'un électro-aimant, est suffisant pour actionner un relai.

Ce dispositif permet de réaliser des régulateurs électriques très précis par suite de l'absence de crasses et de formation d'arc lors de variations très faibles de températures.

Le grand nombre de régulateurs ayant pour base la dilatation cubique montre la faveur dont ont joui et jouissent encore de tels appareils. C'est qu'en effet leur sensibilité est mathématiquement illimitée. Elle est fonction du volume mis en jeu et du diamètre du capillaire où s'opère l'action régulatrice, facteurs sur lesquels il semble que l'on puisse agir indéfiniment. Cependant, la pratique réduit de beaucoup ces possibilités. Dans ses « Recherches sur les thermostats » TIAN (60) fait observer que les régulateurs à dilatation cubique sont très infidèles. « Leurs principales causes d'infidélité sont, d'après cet auteur,

« 1° L'influence de la pression atmosphérique sur les corps dilatables (gaz et à un degré bien moindre, mais encore sensible, liquide très dilatable et relativement très compressible, alcool, acétone, toluène, pentane);

« 2° Lentes déformations de l'enveloppe qui contient le corps, s'il est liquide, déformations qui, dans les thermomètres font varier le zéro;

« 3° Dans les régulateurs contenant un liquide très dilatable relié à du mercure contenu dans un tube en U, passage progressif par capillarité du liquide mouillant le verre entre la paroi du tube et le mercure;

« 4° Modification accidentelle du dispositif qui permet de faire varier la température de réglage (par exemple, desserrage spontané d'une vis, pénétrant dans le mercure du régulateur, pour faire varier le niveau de sa surface libre.

« 5° Altération lente — oxydation, souillures diverses — de la surface métallique (presque toujours du mercure) où se produisent les interruptions et les rétablissements du courant commandant le thermostat.»

Des observations pratiques faites par cet auteur, on déduit que pour la sûreté du fonctionnement, il y a intérêt à ne jamais descendre au-dessous d'un diamètre capillaire de 0 mm. 3 et à guider la pointe du fil de platine afin de produire le contact à un point fixe du ménisque de

préférence au sommet. Ce résultat est obtenu pratiquement au moyen d'une perle de verre traversée par le fil, fait signalé par DUANE et LORY (61). L'auteur signale ensuite les inconvénients du capillaire et montre l'ordre de grandeur de toutes les actions qui peuvent influencer fâcheusement sur la fidélité de ces appareils. Il conclut ainsi : « Les thermostats ayant un grand déséquilibre thermique ne peuvent avoir un réglage précis que par l'emploi de régulateurs dont la sensibilité propre est extrême. Il est, au contraire, possible d'obtenir un réglage aussi précis et plus sûr en employant des régulateurs ne comportant ni tubes capillaires, ni liquides très dilatables et en volume considérable, mais seulement quelques centimètres cubes de mercure si l'on réduit convenablement le déséquilibre thermique — ce qui est facile » (TIAN) (60).

D'autre part, LALANDE (13) a étudié récemment les régulateurs de température à mercure-toluène. Les régulateurs étudiés par cet auteur sont en verre Pyrex pour éviter dans la mesure du possible la dilatation de l'enveloppe. L'étude de ces régulateurs lui a permis de constater que l'inertie du régulateur variait en fonction du diamètre de l'ampoule et non en fonction de la longueur, l'épaisseur de la paroi restant constante (0 mm. 5 environ). Ces résultats sont en accord avec les considérations que nous avons développées au sujet de la transmission de chaleur.

Ce sont sans doute ces raisons, faciles du reste à prévoir par l'étude de la transmission de chaleur que nous avons faite, qui avaient amené des expérimentateurs comme E.-R. WINTON (10) et MENDELEIEFF (18) à diminuer la section et à augmenter la longueur du récipient du régulateur.

Le premier utilisait un appareil contenant 130 c. c. de toluène et 20 c. c. de mercure; le diamètre du tube capillaire était de 1 mm. 4 et le récipient comportait onze ramifications. Le second employait un régulateur constitué par un tube de cuivre rouge en forme de serpentín de 14 mètres de long et de 3 millimètres de diamètre rempli de toluène dont l'extrémité ouverte était reliée à un tube en U rempli de mercure.

Il découle de cette augmentation de surface de contact et de la diminution d'épaisseur du fluide sensible qu'en résulte un autre avantage qui, semble-t-il, n'a pas intéressé les savants qui ont fait jusqu'à présent l'étude critique et mathématique de ce genre de régulateurs. C'est la vitesse d'obtention du régime de sensibilité maxima.

61. DUANE et LORY. — *Am. J. Scien*, 1900 (4), 9, 79.

Rappelons que dans le régulateur, la transmission de chaleur ne peut se faire que par conduction thermique, l'agitation étant impossible. On en déduit que l'équilibre thermique général du régulateur sera d'autant plus rapide que sa paroi sera mince et conductrice, que les surfaces de contact seront grandes et que l'épaisseur du fluide régulateur sera faible. A ce point de vue la réalisation de MENDELIEFF paraît donner le plus de satisfaction. Cette propriété nous semble particulièrement précieuse pour un régulateur de température. En effet, pratiquement, l'expérimentateur ayant besoin d'opérer à température constante soit en biologie soit en bactériologie soit même pour de nombreuses mesures physico-chimiques, désire non pas l'obtention de températures ultra-précises, mais de pouvoir se mettre rapidement à une température relativement stable à $1/20$ à $1/50$ de degré près et de s'y maintenir sûrement pendant tout le temps d'une mesure. Or, la plupart des régulateurs à dilatation existant sont très longs à atteindre leur sensibilité de régime; il s'ensuit, une variation progressive et lente de la température de fonctionnement du régulateur, ce qui ne permet l'obtention d'un régime stable, qu'après un temps de fonctionnement pouvant atteindre plusieurs jours. Mais d'autre part, ces considérations nous amènent à réaliser des appareils encombrants et fragiles, qui occupent parfois, la plus grande partie de l'enceinte qu'il s'agit de maintenir à température constante, ne laissant d'utilisable que très peu de place pour l'expérimentation. C'est par exemple le cas du thermostat ultra-sensible de WINTON (10) dans lequel le régulateur, la résistance chauffante, l'agitateur et le thermomètre de contrôle occupent presque la totalité du vase de Dewar constituant l'enceinte. Nous voyons que, pour toutes les raisons que nous venons d'énoncer, les régulateurs à dilatation cubique sont loin d'avoir les qualités requises pour un bon régulateur. Nous retiendrons surtout, comme principaux inconvénients, leur mise en équilibre lente et la présence d'un capillaire, dont de nombreux perfectionnements n'ont pu qu'atténuer légèrement les principaux défauts.

C. — TENSION DE VAPEUR.

Si dans un tube barométrique rempli de mercure on introduit un liquide, on voit le niveau du mercure s'abaisser. Il s'est établi pour une température donnée un équilibre entre ce liquide et sa vapeur saturante. Si on élève la température on voit le mercure descendre de plus en plus. En mesurant les hauteurs de mercure, on s'aperçoit que la variation qui, au début, est très faible croît très rapidement avec la température.

Le tableau suivant, donnant les tensions de vapeur de l'éther en centimètre de mercure à différentes températures, montre que, pour une variation de température de 10° , la tension de vapeur augmente de 11 centimètres de mercure entre 0 et 10° , tandis que la variation est de 122 centimètres de mercure entre 100 et 110° . La variation de tension de vapeur n'est donc pas proportionnelle à celle de la température. C'est probablement une des raisons pour lesquelles ce phénomène a été peu utilisé pour la construction d'un régulateur :

Tension de vapeur de l'éther.

{	—	-10°	—	0°	—	10°	—	20°	—	30°	—	40°	—	50°	—	60°	—	70°	
{	—	11,18	—	18,49	—	29	—	44	—	64	—	92	—	127	—	172	—	229	
{	—	-80°	—	90°	—	100°	—	110°	—	120°									
{	—	299	—	383	—	485	—	607	—	749									

D'autre part cette propriété est très influencée par la variation de la pression atmosphérique, ce qui oblige, dans le cas de déterminations très précises, et de longues durées, à prévoir des dispositifs compensateurs de cette variation. Mais, d'autre part, on obtient des variations importantes avec la température, et cela sans employer de grands volumes de liquides actifs, la tension de vapeur étant une propriété inhérente à la nature du corps et non à la masse de ce corps mise en jeu. On peut donc réaliser sur cette base des régulateurs de petites dimensions doués d'une grande sensibilité et s'équilibrant très rapidement. De plus, le capillaire n'est plus une nécessité et, avec lui, disparaissent tous les inconvénients qu'il présente. Les expériences et les mesures à température constante que l'on est appelé à réaliser étant en général de courte durée, l'influence de la variation de pression atmosphérique sera la plupart du temps négligeable. C'est pourquoi, nous avons choisi cette propriété comme base d'un régulateur sensible et d'équilibre rapide, susceptible d'être utilisé pour résoudre de nombreux problèmes de régulation. Nous étudierons donc plus spécialement ce phénomène et son application pratique lors de l'exposé de la réalisation qui servira de conclusion à ce chapitre sur les régulateurs.

C. — Propriétés optiques.

Jusqu'à ces dernières années les variations des propriétés optiques avec la température n'avaient pas été employées pour la réalisation de régulateurs.

La découverte de la cellule photo-électrique pourrait permettre maintenant l'emploi de tels phénomènes. La réfraction et la polarisation pourraient être utilisées dans ce but.

A. — RÉFRACTION.

L'indice de réfraction d'une substance, rapport des vitesses de propagation de la lumière dans les deux milieux traversés, varie avec la température.

Les radiations étant d'autant moins déviées que leur longueur d'onde est plus grande, on aura intérêt à utiliser les radiations violettes ou ultra-violettes et une cellule dont la sensibilité soit maxima pour ces radiations.

On pourrait concevoir une circulation continue du liquide chauffé dans un tube de section prismatique que traverserait un rayon lumineux mono-chromatique. Sous l'influence de la variation de l'indice de réfraction, provoquée par la variation de la température, le rayon réfracté serait dévié et, tombant sur la cellule, actionnerait un relai agissant sur la source chauffante. On conçoit qu'en plaçant la cellule de telle façon qu'elle soit influencée au moment où la température que l'on veut obtenir est atteinte, on puisse réaliser de ce fait un régulateur de température.

B. — POUVOIR ROTATOIRE.

Le pouvoir rotatoire de certaines substances et en particulier des sucres varie avec la température. On pourrait donc envisager l'utilisation de cette variation pour construire un régulateur de température. Un rayon de lumière polarisée traversant le liquide régulateur passerait dans un nicol analyseur avant de venir frapper une cellule photo-électrique agissant par l'intermédiaire d'une lampe amplificatrice sur la source chauffante. En employant une solution suffisamment concentrée, un tube très long, en utilisant une radiation lumineuse correspondant au pouvoir rotatoire le plus fort et une cellule très sensible ayant sa sensibilité maxima pour la radiation utilisée, il est possible d'obtenir des résultats intéressants.

Nous n'avons pas rencontré de régulateurs basés sur les propriétés optiques. Cependant leur réalisation très délicate n'est pas impossible, mais le résultat que l'on pourrait obtenir semble hors de proportion

avec la difficulté de réglage et le prix des moyens mis en œuvre. Cela peut tenter des esprits curieux mais ne paraît pas susceptible d'utilisation pratique.

D. — Propriétés électriques.

Parmi les propriétés électriques, les variations de résistance et de force électromotrices de couples thermo-électriques peuvent servir de base à la construction de régulateurs.

I. — RÉSISTANCES.

a) *Métaux*. — La résistance d'un conducteur métallique est donnée par la formule : $R = \frac{\rho (1 + \alpha t) L}{S}$

Pour les métaux usuels α a une valeur allant de $8,87 \cdot 10^{-4}$ à $60 \cdot 10^{-4}$.

Les alliages ayant en général des coefficients de variation thermique plus faibles que les métaux purs, ne sont pas intéressants pour cet usage. Parmi eux, le constantan (0,6 Ni- 0,4 Cu), l'électriman (0,638 Fe-0,36. Ni -0,002 C), le manganin (Cu- Mn- Ni) ont des résistivités très élevées et des coefficients de variation thermique presque nuls. On les utilisera avec profit pour la fabrication de résistances chauffantes.

b) *Electrolyte*. — La résistance de l'électrolyte est inversement proportionnelle à la concentration de la solution; elle diminue avec la température et son coefficient de variation est de l'ordre de $-0,02$.

Des modifications peu importantes apportées à différents thermomètres basés sur l'application de ces variations permettent la construction de régulateurs de température. Ces thermomètres ont pour but en général, de mesurer des températures supérieures à 350° , températures que le thermomètre à mercure ne peut dépasser. Parmi ceux-ci, le plus connu d'entre eux est le thermomètre à résistance de platine utilisé dans la détermination des températures de petits fours électriques. L'emploi du platine est intéressant dans ce cas par suite de son point de fusion élevé (1764°), mais son coefficient de variation 38×10^{-4} n'est pas très élevé. Dans le cas qui nous intéresse (températures comprises entre 0° et 250°), on pourra avoir recours à d'autres métaux, dont le coefficient de température est plus important comme le nickel (coefficient 0,0060), le fer (coefficient 0,0055).

Généralement, on place la résistance sensible en série dans un circuit comprenant un galvanomètre spécial et une source de courant (accumulateur ou courant alternatif redressé). Un artifice de construction du galvanomètre, rend la déviation indépendante des variations du courant. Une résistance additionnelle, permet de corriger les erreurs pouvant provenir du fil de jonction de la résistance proprement dite au circuit. Le galvanomètre est gradué en degrés et une simple lecture permet de déterminer la température à 1° près.

Les appareils ainsi conçus ne donnent pas une précision suffisante pour résoudre le problème cherché. Une sensibilité beaucoup plus grande ($1/20$ de degré) peut être obtenue en utilisant cette résistance sensible dans un montage en pont de Wheastone.

On réalise ainsi, l'appareil connu sous le nom de bolomètre. Un galvanomètre fonctionnant en appareil de zéro, une boîte de résistance variable capable de rétablir l'équilibre rompu par la variation de température, deux résistances fixes, complètent l'appareillage. Connaissant la valeur de la résistance sensible et son coefficient de variation thermique, il est possible de calculer d'avance les résistances capables d'équilibrer le pont pour des variations de 10° , 1° , et $0,1^{\circ}$ et de lire directement la température atteinte d'après la résistance utilisée pour ramener le galvanomètre au zéro. Comment modifier ces appareils pour les transformer en régulateurs? Il suffirait de monter sur le galvanomètre, de part et d'autre du zéro, deux contacts isolés commandant chacun, un relai agissant sur la source chauffante. L'un d'eux correspondant à une température plus basse que la température désirée admettrait un débit calorifique plus grand, l'autre, au contraire, diminuerait l'intensité de la source chauffante.

La sensibilité très grande de ces dispositifs, leur fidélité de fonctionnement et leur équilibre thermique rapide en font des appareils de haute précision. Malheureusement ils sont coûteux et relativement fragiles. J.-A. BEATTIE et D.-D. JACOBUS (62) décrivent un régulateur thermique automatique basé sur ce principe. Il se compose d'une résistance de platine montée dans un pont de Wheastone équilibré, agissant sur un galvanomètre sensible à miroir, réfléchissant un faisceau lumineux sur des cellules photoélectriques, dont l'action s'exerce sur la grille de lampes amplificatrices. Le dispositif comprend deux cellules: l'une fer-

62. BEATTIE (J. A.) et JACOBUS (D. D.). — *J. of Phys. Chem.*, 1930, **34**, 1254/1259.

mant et l'autre ouvrant le circuit de chauffage. Ces appareils très précieux pour l'obtention de températures ultra-précises, sont trop compliqués pour être d'un usage courant et pratique.

II. — PILES THERMO ÉLECTRIQUES

Les variations de force électromotrice de l'ordre de quelques millivolts par 100° exigent l'emploi d'appareils de mesure très sensibles. On peut également les mettre en évidence par un montage en pont de Wheastone. Leur utilisation semble être réservée à la régulation de hautes températures (fours électriques) où les conditions d'emploi rendent impossible l'usage d'autres appareils. Il en est de même de l'utilisation des variations de l'énergie rayonnée suivant la loi de Stephan obtenue en adaptant à des appareils déjà connus (pyromètres) des systèmes de relais agissant sur la source chauffante.

E. — Conclusions.

De l'examen que nous venons de faire, il résulte que le classement des différentes propriétés physiques variant avec la température et utilisables pour la construction de thermo-régulateurs, basé sur l'importance des effets obtenus pour un même écart de température s'établit comme suit :

- Tension de vapeur;
- Dilatation des gaz, liquides et solides;
- Résistance électrique;
- Couple thermo-électrique;
- Propriétés optiques.

Pour les températures employées couramment au Laboratoire, la tension de vapeur et la dilatation présentent, seules, un intérêt pratique. Les autres propriétés semblent devoir n'être utilisées que dans des cas spéciaux où les conditions d'emploi empêchent l'usage des deux premières.

II. — ÉTUDE D'UN NOUVEAU RÉGULATEUR

A. — Généralités.

Rappelons en quelques mots les conditions exigées d'un bon régulateur :

- Équilibre thermique rapide;
- Sensibilité aux variations de température;
- Fonctionnement précis indépendant de l'ambiance;
- Robustesse et prix;
- Grande échelle de température.

Des régulateurs étudiés, aucun ne satisfait à ces conditions.

Les bi-métalliques sont peu sensibles et ne peuvent servir qu'en milieu gazeux.

Les régulateurs à dilatation cubique doivent, pour avoir une certaine sensibilité, occuper un grand volume. Or, pour réaliser un équilibre thermique rapide, il faut augmenter les surfaces de contact et réduire l'épaisseur du fluide actif, car la transmission ne s'y fait que par conduction. Ceci entraîne un encombrement important et une réalisation difficile. D'autre part, par construction ils nécessitent la présence d'un capillaire dont les modifications apportées n'ont pu que réduire les inconvénients.

Ces considérations ont fait porter notre choix sur l'utilisation des variations de la tension de vapeur. Cette propriété est fonction de la substance utilisée et non de la masse de cette substance. De ce fait, l'utilisation d'un régulateur de grande dimension et d'un capillaire de faible diamètre n'intervient pas dans l'évaluation de la sensibilité, qui est fonction seulement de la nature de la substance et des températures à réaliser. Malgré l'absence de capillaire, nous avons constaté que les étincelles répétées amenaient l'oxydation de la surface du mercure, qui, faisant la queue, rendait le fonctionnement de l'appareil moins sûr. Une couche d'huile placée à la surface du mercure n'a pas apporté d'amélioration, par suite du mercure colloïdal qui se forme à la longue et rend l'huile plus ou moins conductrice. C'est pourquoi, banissant toute solution délicate, nous avons cherché des dispositifs où l'étincelle, se faisant hors du mercure régulateur, n'exerce pas son action néfaste sur la stabilité de cet appareil. Avant d'entreprendre

l'étude et la réalisation d'un tel appareil, nous allons passer rapidement en revue quelques régulateurs basés sur ce principe.

En suivant l'ordre chronologique, nous trouvons le régulateur à gaz de BORDIER (63), modifiant une trompe à eau en régulateur à gaz, solution très ingénieuse, n'employant que du matériel en usage courant dans un laboratoire. Le réglage se fait par variation du niveau entre la trompe et l'enceinte contenant le régulateur. Mais, dans cette solution l'inconvénient du capillaire n'est pas évité et le gaz est en contact avec le mercure. D'autre part, le réglage de la hauteur de mercure nécessite un support spécial à crémaillère et il faut une longue canalisation en caoutchouc pour joindre le récipient au régulateur, ce qui rend l'appareil encombrant.

Le même inconvénient n'est pas à craindre avec le thermo-régulateur MUENCKE (64) dans lequel la tension de vapeur agit sur une membrane en caoutchouc contenant le mercure, mais cette enveloppe peut être attaquée par les vapeurs de liquide volatil. D'autre part l'élasticité du caoutchouc peut varier et la sensibilité de l'appareil peut ainsi s'en trouver diminuée. Enfin les inconvénients dus au contact du mercure avec le gaz ou l'étincelle électrique ne sont pas évités.

Le régulateur réalisé par OTHMER (65) emploie un tube en U et supprime ainsi la membrane en caoutchouc, mais l'auteur n'indique pas de procédés spéciaux pour éviter l'effet nuisible de l'étincelle dans le mercure.

Dans le régulateur de POLISSAR (66) la sensibilité est variable par suite de l'inclinaison possible d'une des branches de l'U. Le réglage se fait par bords en branchant le courant sur un contact de tungstène soudé dans le verre, l'extrémité du tube est scellé et contient un gaz inerte. Ce régulateur bien étudié ne peut cependant servir que dans un écart de température relativement restreint. L'échange de liquide ne semble pas facile une fois le régulateur construit. D'autre part les intensités de courant coupées ne peuvent pas être importantes du fait de la fragilité du contact de tungstène.

Avec le régulateur de COLLINS (67) nous voyons apparaître l'idée d'un contact extérieur au mercure. Malheureusement, de par la cons-

63. BORDIER (H.). — *Bul. Phar. de Lyon*, n° 1, janvier 1904, 306.

64. MUENCKE. — *Nouveautés Chimiques*, 1912, p. 57/58.

65. OTHMER (D. F.). — *Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.)*, 1929, **1**, 97.

66. POLLISSAR (M. J.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1930, **52**, 636/637.

67. COLLINS (S. C.). — *J. Phys. Chem.*, 1929, **33**, 1650.

truction présentée, ce régulateur ne peut fonctionner que dans les thermostats à air. De plus, la présence d'un ressort dont l'élasticité peut varier n'assure pas une grande fidélité à ce dispositif.

Enfin, le régulateur ESCLANGON (68), parfait théoriquement, n'est pas d'un emploi pratique.

B. — Construction du régulateur proprement dit forme, matière, dimension.

Forme. — Nous référant aux recherches antérieures nous avons examiné d'abord les formes des régulateurs déjà étudiées. Pour des raisons déjà signalées nous avons écarté les dispositions proposées dans l'utilisation de la trompe à eau comme trop sujettes à dérèglement et nous n'avons considéré que les solutions permettant ce que nous appellerons un montage mono-bloc. L'examen du dispositif MUENCKE nous a fait penser à une solution possible supprimant la membrane de caoutchouc et nous avons imaginé le dispositif (fig. 5) :

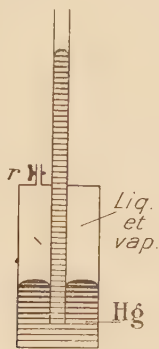


FIG. 5. — *Modification possible du thermorégulateur Muencke.*

Ce dispositif avait l'avantage de constituer un ensemble robuste, mais son remplissage en mercure, l'introduction du liquide volatil, étaient très difficiles sans la présence d'un robinet situé en « r ». Nous n'avons pas voulu placer de robinetterie dans le thermostat, d'abord parce qu'il est très difficile d'avoir un robinet tenant la pression dans

68. ESCLANGON (E.). — Mémoires de la Soc. des Sciences Physiques et Naturelles de Bordeaux, janvier 1911.

l'eau à des températures variables, par suite de dilatation plus ou moins rapide du verre, et surtout parce qu'au cours de manipulations dans le thermostat on pourrait l'ouvrir accidentellement ce qui amènerait l'écoulement du mercure et le dérèglement de l'appareil. De plus, cette forme augmenterait beaucoup le diamètre du récipient actif et diminuerait sa sensibilité aux variations de la température. C'est pourquoi nous ne nous sommes pas arrêtés à un tel dispositif. Le tube barométrique du régulateur ESCLANGON, trop grand pour se placer dans une enceinte thermostatique ne pouvait non plus être retenu. La forme de tube en U, dont on peut par construction accorder les dimensions avec celle du thermostat, est donc la plus apte à constituer un régulateur universel. Son remplissage en mercure peut se faire facilement par basculement du tube. L'introduction du liquide actif y est également commode. Cette forme peut être utilisée de différentes façons, soit à deux tubes verticaux, soit à une branche inclinée. Nous retiendrons la forme des deux branches verticales comme étant moins encombrante et se prêtant mieux à l'action sur la source de chauffage.

Pour nos essais, nous avons adopté la forme du tube en U fermé à une de ses extrémités et avons utilisé à cet effet un tube barométrique recourbé :

Matière. — Nous étant arrêté à une forme déterminée, il a fallu envisager le choix de la matière constituant l'enveloppe. Cette matière devra être, autant que possible, très bonne conductrice de la chaleur. Si nous examinons la liste des substances utilisables, nous voyons que les métaux et parmi eux, le cuivre, sont particulièrement conducteurs. Mais, cette enveloppe étant destinée à contenir du mercure, il ne faut pas employer un métal susceptible de former un amalgame, car l'enveloppe serait vite percée. D'autre part, le métal étant opaque, il serait difficile de contrôler le bon remplissage de l'appareil. Cependant, l'emploi de l'aluminium qui n'est pas attaqué à l'abri de l'air, pourrait être envisagé.

Parmi les substances autres que les métaux, nous citerons dans l'ordre de conductibilité croissante : le verre, le cristal, la porcelaine, le Pyrex, le quartz. Ce dernier semble particulièrement intéressant vu sa conductibilité élevée, sa transparence, son faible coefficient de dilatation, et sa haute température de fusion. Le coefficient de dilatation de la matière constituant l'enveloppe n'aura que peu d'importance si les deux bras du tube en U sont en matière identique. En effet, la dilatation sera à peu près la même pour chaque branche puisque la même hauteur

de matière sera de chaque côté portée à une même température, celle de l'enceinte. Quant à la dilatation cubique il n'y aura pour annuler son effet qu'à donner aux deux branches la même section, la dilatation du mercure contenu sera à peu près identique dans les deux branches et on pourra considérer l'effet obtenu comme uniquement régi par la variation de tension de vapeur. Pour les raisons ci-dessus indiquées nous prendrons de préférence un tube de quartz, de faible section (1 cm^2 de section intérieure, semble suffisant pour une bonne sensibilité sans effet capillaire) fermé à une de ses extrémités et recourbé en U, la branche ouverte étant plus longue que la branche fermée de façon à ce qu'elle puisse sortir de l'enceinte isothermique. La commande de régulation se faisant de l'extérieur.

Dimensions. — Les dimensions des deux branches seront fonction des échelles de température que l'on voudra couvrir avec un même liquide et pour une sensibilité donnée.

L'examen des tables de tension de vapeur en fonction de la température, nous montre que la variation de cette tension n'est pas une fonction linéaire de la température. Elle augmente très rapidement avec « t » et nous voyons en prenant pour exemple l'éther sulfurique, qu'une variation de température de 10° entre 0 et 10° augmente la tension de vapeur de 10 cm. 5 de mercure tandis que le même écart entre 100 et 110° correspond à une variation de 122 centimètres de mercure soit, plus de 10 fois plus.

Nous voyons que l'on aura intérêt au point de vue sensibilité à opérer avec des liquides à point d'ébullition peu élevés pour obtenir, pour les températures auxquelles on désire maintenir l'enceinte, une grande variation de tension de vapeur. Cependant, dans cet ordre d'idée, il est prudent de ne pas dépasser certaines limites et des variations de plus d'un atmosphère par 10° peuvent devenir dangereuses en cas de surchauffe accidentelle et provoquer par suppression des explosions. Pour éviter ce risque on pourrait augmenter l'épaisseur des parois des récipients où s'exercerait cette pression, mais cela diminuerait la vitesse de transmission de la chaleur de l'enceinte au liquide volatil et nuirait à la sensibilité de l'appareil. C'est pourquoi, nous avons décidé d'opérer à une pression oscillant autour de 1 atmosphère. D'autres considérations concernant la compensation de la variation de la pression atmosphérique ont aussi guidé notre choix.

Considérons un tube recourbé selon les figures 6 et 7.

Après l'avoir rempli totalement de mercure, nous avons introduit une petite quantité de liquide volatil puis, nous avons fait écouler une partie du mercure contenu dans la branche en relation avec l'air libre. Soit « h » la différence de hauteur dans les deux branches, nous voyons que le liquide est soumis à une pression égale atmosphérique augmentée de « h ». Plongeons le dispositif dans un récipient plein d'eau dont nous élevons lentement la température. A un certain moment le

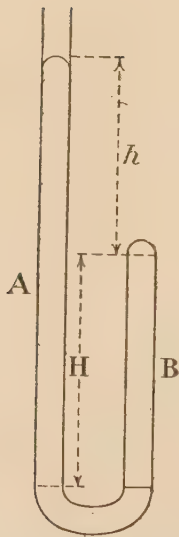


FIG. 6. — Régulateur fonctionnant à pression constante.

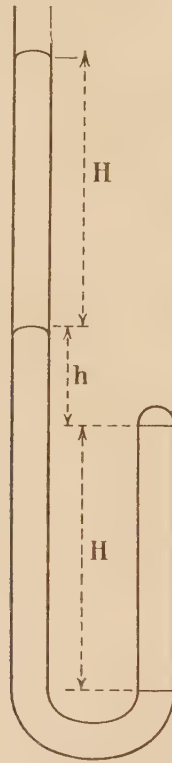


FIG. 7. — Régulateur fonctionnant à pression variable.

mercure descend dans la branche « B ». Nous avons atteint la température pour laquelle la tension de vapeur du liquide est égale à $P + h$ (P représentant la pression atmosphérique). Si nous continuons à chauffer le mercure continuera à descendre en « B » pour monter en « A ». Nous cessons de chauffer lorsque le mercure est à 1 centimètre environ de la courbure pour éviter que les vapeurs de liquide passent dans la branche « A » et ne projettent le mercure.

On peut considérer l'utilisation du phénomène soit à pression constante, soit à pression variable. Dans le premier cas, on maintient constante la hauteur du mercure dans la branche A et les pressions extrêmes utilisables sont $P + h$ et $P + h + H$. Dans le second, si le mercure descend de H dans B, il monte également de H dans A. La pression maxima d'utilisation est $P + h + 2H$ et les températures extrêmes que l'on peut régler correspondent aux pressions $P + h$ et $P + h + 2H$.

Nous voyons ainsi comment choisir les dimensions de l'appareil pour une échelle donnée. Soit :

T	la température correspondant à	$P + h$
T'	—	à $P + h + H$
T''	—	à $P + h + 2H$

Dans le premier cas la dénivellation moyenne par degré sera égale à $\frac{H}{T' - T}$.

Dans le second cas, elle aura pour valeur $\frac{2H}{T'' - T}$.

Comme la pression varie plus rapidement que la température, nous voyons que, pour une même valeur de h et de H , l'échelle est plus grande et la sensibilité moindre dans le cas où l'on laisse varier la pression.

Un exemple numérique va nous montrer l'ordre de grandeur de ces variations. Si l'on prend $H = 25$ cm. $h = 15$ cm. et $P = 76$ cm. Hg la pression minima sera $76 + 15 = 91$ cm. Hg. A pression constante la pression maxima sera $76 + 15 + 25 = 116$ cm. Hg. A pression variable cette valeur sera $76 + 15 + 50 = 141$ cm. Hg.

Si l'on utilise l'éther comme liquide, on aura sensiblement :

$$T = 39^{\circ}75 \quad T' = 46^{\circ}5 \quad T'' = 52^{\circ}5$$

Dans le premier cas on couvrira une échelle de $6^{\circ}75$. Dans le second, de $12^{\circ}75$. La dénivellation sera respectivement de 3,70 et de 1,96 cm. par degré.

Faisons maintenant varier H ; soit $H = 35$. Dans ce cas :

$$\begin{array}{ll} P' = 126 \text{ cm. Hg} & T' = 49^{\circ} \\ P'' = 161 \text{ cm. Hg} & T'' = 57^{\circ} \end{array}$$

Les échelles utilisables sont alors $9^{\circ}25$ et $17^{\circ}25$. Les sensibilités 3,7 et 2, sont sensiblement les mêmes. Une augmentation de H élargit donc l'échelle et est sans action sur la sensibilité.

Enfin, si $h = 35$ cm. $H = 25$ cm. et $P = 76$ cm. Hg, on aura :

$$\begin{array}{ll} P = 111 \text{ cm. Hg} & T = 45^{\circ} \\ P' = 136 \text{ cm. Hg} & T' = 51^{\circ}5 \\ P'' = 161 \text{ cm. Hg} & T'' = 57^{\circ} \end{array}$$

Les échelles seront de $6^{\circ}5$ et $12^{\circ}5$ et les dénivellations de 3.84 et 2^o08. L'augmentation de h s'est donc traduite par un gain de sensibilité et une diminution de l'échelle utile.

C. — Échelle de température.

Nous avons vu que le régulateur ainsi construit ne pouvait fonctionner qu'entre deux tensions de vapeurs T_1 et T_2 déterminées par les caractéristiques géométriques de l'appareil. Nous allons maintenant étudier comment choisir le liquide à employer pour obtenir la régulation à une température déterminée. Les tensions de vapeurs des

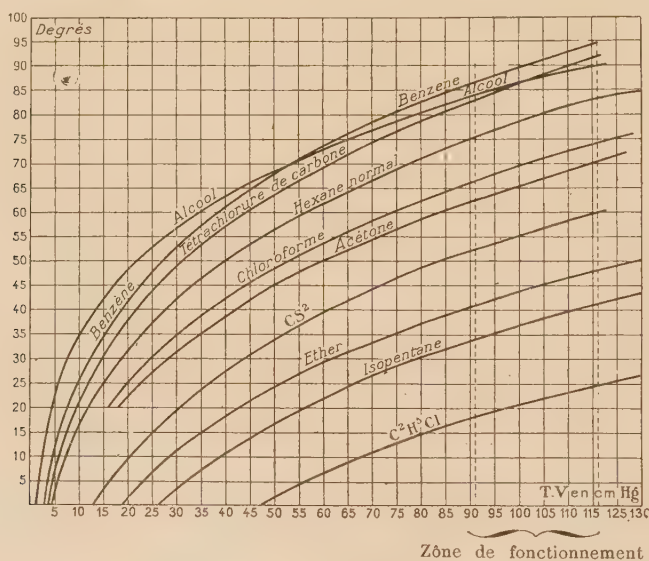


FIG. 8. — Courbe des tensions de vapeurs de différents liquides.

liquides usuels ont été déterminées à diverses températures et les tables qui expriment ces résultats permettent de déterminer le liquide dont la tension de vapeur pour la température choisie est comprise dans les limites de fonctionnement de l'appareil. Cependant nous avons, pour éviter des recherches fastidieuses, réuni ces différents résul-

tats par une série de courbes donnant en fonction de la température la tension de vapeur de différents liquides d'usage courant dans les laboratoires ou qu'il est facile de se procurer (fig. 8). L'examen de cet ensemble de courbes entre les pressions H1 et H2 permettra de choisir le liquide correspondant à la température de régulation désirée.

Par exemple, si $H = 25$ cm. et $h = 15$ cm. et $P = 76$ cm. on aura comme valeurs limites de la tension de vapeur utilisable 91 cm. et 116 cm de mercure ce qui correspondra approximativement à une gamme de température allant :

de 86°5 à 95°	en employant le Benzène
de 84° à 90°	— l'Alcool
de 82°5 à 91°	— le Tétrachlorure de Carbone
de 75° à 83°	— l'Hexane normal
de 66° à 73°	— le Chloroforme
de 61°5 à 69°5	— l'Acétone
de 52° à 60°	— le Sulfure de Carbone
de 40°5 à 48°5	— l'Éther
de 33°5 à 41°5	— l'Isopentane
de 18° à 25°	— le Chlorure d'Ethyle

Nous remarquons que les températures les plus basses sont environ plus élevées de 5° que les points d'ébullition des liquides utilisés.

Pour des températures supérieures à 100°, on peut utiliser par exemple le toluène, l'essence de térébenthine, le bromure d'éthylène, le xylène, l'heptane et l'octane.

Des chiffres énoncés ci-dessus il résulte que la gamme de température couverte est discontinue et que nous ne pourrions obtenir la régulation pour certaines températures si nous nous limitons à l'emploi de ces liquides. Ne voulant employer que des liquides courants nous avons pensé à utiliser non pas des liquides purs, mais des mélanges de ces liquides. Nous rappellerons brièvement ici la manière dont varie la tension de vapeur de mélanges binaires. Nous envisagerons : 1° le cas du liquide non miscible; 2° le cas de liquides parfaitement miscibles.

1° Dans le cas de liquides non miscibles, la tension de vapeur du mélange à une température est égale à la somme des tensions de vapeur des deux liquides à cette même température. La pression totale ne dépend pas des quantités relatives des deux liquides, s'ils existent dans le mélange en quantité suffisante, chaque constituant se comportant comme si il était seul;

2° Dans le cas de liquides parfaitement miscibles deux conditions peuvent se présenter :

a) Les deux liquides appartiennent à une même série homologue. La tension de vapeur du mélange est donnée par la formule :

$$100 P = M^1 p^1 + M^2 p^2 = M^1 p^1 + (100 - M^1) p^2$$

formule dans laquelle :

- P représente la tension de vapeur du mélange à la température t;
- p^1 représente la tension de vapeur d'un liquide L^1 à cette même température;
- p^2 représente la tension de vapeur du liquide L^2 à cette même température;
- M^1 représente le nombre de molécules du liquide L^1 dans 100 molécules du mélange;
- L^2 représente le nombre de molécules du liquide L^2 dans 100 molécules du mélange.

Nous voyons que la tension de vapeur obtenue est une fonction linéaire de la composition moléculaire du mélange. Le toluène et le benzène, le pentane et l'hexane, pourront donc constituer un mélange de ce genre. Dans ce cas, les tensions de vapeur à température constante pourront être établies par les courbes ci-jointes relatives au pentane et à l'hexane.

b) Les deux constituants du liquide n'appartiennent pas à une même série homologue. Dans ce cas, la courbe représentative de la pression de vapeur en fonction de la composition du mélange pour une température donnée n'est plus une droite. Trois cas peuvent se présenter.

1° La pression varie constamment dans le même sens. Exemple : mélange d'alcool éthylique et d'éther ordinaire.

2° La pression passe par un maximum. Ainsi, pour un mélange de 20 volumes de benzine et de 80 volumes d'alcool, on a à 30° $P = 14$ cm. 2, tandis que, à la même température la tension maxima de la benzine est de 12 cm. et celle de l'alcool 7 cm. 9.

3° Enfin, la pression de vapeur peut passer par un minimum, c'est le cas de mélange d'acétone et de chloroforme (AUBERT) (69).

Pour l'obtention de tension de vapeur destinée à rendre utilisable le régulateur pour les températures non couvertes par les liquides purs

69. AUBERT (M.). — Les Combustibles liquides et le problème du carburant National. — Encyclopédie Léauté (2^e série), 1924, Masson et C^o.

il semble que l'utilisation de liquides miscibles d'une même série homologue soit d'un emploi plus pratique. En effet, la variation linéaire de la tension de vapeur, en fonction de la composition du mélange, permet de déterminer *à priori* les proportions respectives des liquides employés. C'est ainsi que la courbe (fig. 9) nous indique que, pour le régulateur précédemment étudié où $P_1 = 91$ et $P_2 = 116$, les proportions, p. cent

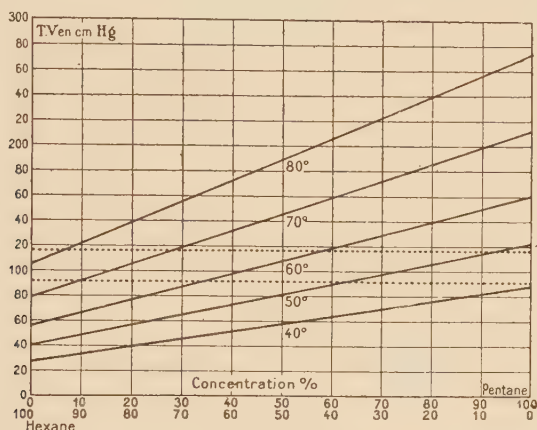


FIG. 9. — Tension de vapeur du mélange Hexane Pentane.

..... } zone de fonctionnement.
 }

de pentane pour les températures réglables les plus basses de 50°, 60°, 70° seront 62 p. cent, 35 p. cent et 10 p. cent. Les températures les plus hautes de 50-60-70-80° correspondent à 95 p. cent, 59 p. cent, 28,5 p. cent et 6 p. cent. Ces 2 liquides permettent donc de couvrir la gamme 42° (Pentane pure) à 83° (Hexane pur).

D. — Action du régulateur sur la source chauffante.

La suppression du contact avec le mercure nous oblige à concevoir une action mécanique à distance. La commande de la source de chauffage devant se faire en dehors du mercure du régulateur.

Nous avons donc, sortant de l'enceinte, une portion de tube contenant du mercure qui se déplace suivant la température de l'enceinte où se trouve le reste de l'appareil. Comment utiliser ces variations pour agir sur la source chauffante? Deux cas se présentent : 1° Nous opérons à pression constante. Dans ce cas, au fur et à mesure que la température s'élève, le mercure s'écoule à la partie supérieure du tube et, comme

dans le régulateur Esclangon, nous pourrions faire arriver ce mercure dans un récipient placé à l'extrémité d'un fléau sensible, en équilibre, ce qui entraînera l'oscillation du fléau et commandera la rupture ou la fermeture du circuit de chauffage; 2° Si nous opérons à pression variable, on pourra utiliser la variation de poussée produite par le mercure sur un flotteur relié à un fléau équilibré ou à un système de poulie semblable à celui des baromètres à cadran. Dans le cas du fléau, le réglage de la température désirée se fera par le déplacement de l'équilibre du fléau au moyen d'une masse variable, placée sur un plateau, ou en faisant se déplacer une masse de valeur déterminée le long du fléau.

A. — RÉGULATEUR A PRESSION CONSTANT.

La réalisation d'un tel régulateur peut se faire très simplement selon le schéma (fig. 10-1).

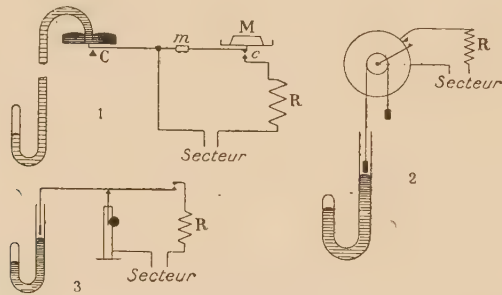


FIG. 10. — Action du régulateur sur la source chauffante.

1. Type balance. — 2. Type baromètre à cadran. — 3. Type balance de Mohr.

La partie supérieure du tube régulateur est recourbée et vient plonger dans une cuve à mercure placée sur le plateau d'une balance. L'équilibre initial est réalisé au moyen d'une tare M. Le mercure, chassé par la variation de pression de vapeur vient s'ajouter à celui de la cuve, et, rompant l'équilibre, coupe le contact en c. Une cale C empêche le fléau de prendre une inclinaison susceptible de faire sortir le tube de la cuve. Une masse m se déplaçant le long du fléau, permet de régler l'appareil à la température désirée. Le calcul montre que, si l'on a $H = 25$ cm., si la section du tube est de 1 cm^2 , le poids de mercure susceptible d'être déplacé est de $25 \times 13,6 = 340$ grammes. Nous avons vu que dans ce cas, si $h = 15$ cm. l'échelle de température couverte est de $6^{\circ}75$, ce qui correspond à un déplacement de 50 gr. de mercure par degré. Il

faudra donc construire un fléau sensible à 1 gramme sous une charge de 340 grammes pour réaliser un régulateur sensible au $1/50^{\text{e}}$ de degré. Or, un tel fléau est très facilement réalisable et un tel procédé peut nous permettre d'obtenir une sensibilité bien supérieure.

Ce dispositif très sensible, se montre d'une utilisation difficile. Le remplissage du tube à double courbure, l'introduction du liquide actif et la mise en place de la cuve nécessite une certaine habileté. Le réglage de l'équilibre est délicat à réaliser. Cependant, dans des mains expérimentées cet appareil donne de très bons résultats. Il ne comporte pas de réglage de hauteur de mercure. Enfin, il se prête particulièrement à la compensation des variations de pression atmosphérique.

B. — RÉGULATEURS AGISSANT A PRESSION VARIABLE

Type baromètre à cadran (fig. 10-2). — Ce dispositif utilise la poussée du mercure sur un flotteur en faisant tourner une poulie qui déplace un contact placé à l'extrémité d'une aiguille. L'autre contact s'établit au moyen d'un curseur se déplaçant sur une circonférence concentrique à la poulie. Si r est le rayon de la poulie, H la hauteur de mercure utilisable, et n le nombre de degrés de l'échelle couverte, nous voyons que la poulie fera un tour complet pour une différence de hauteur de mercure égale à $2\pi r$. Si nous voulons obtenir un tour complet de la poulie pour 1 degré, nous devons avoir $\frac{H}{n} = 2\pi r$ d'où $r = \frac{H}{2\pi n}$.

Dans la réalisation envisagée nous avons $H = 25$; $n = 12,50$.

D'où $r = 0,318$ cm.

La poulie devra donc avoir un diamètre d'environ 0 cm.63. Pour une sensibilité de $1/50$ de degré et une longueur de l'aiguille de 10 centimètres l'arc de réglage sera de $\frac{2 \times \pi \times 10}{50}$ soit environ 1,26 cm.

L'angle de rotation de la poulie sera de $\frac{360}{50}$ soit d'un peu plus de 7° .

Or, il existe dans le commerce de petits contacteurs à mercure dans le vide, fonctionnant parfaitement pour une rotation de 7° ce qui éviterait l'emploi d'une aiguille, mais nécessiterait l'emploi d'un relai, les intensités coupées par de tels appareils étant de l'ordre du milliampère.

Comme dans la réalisation précédente, l'utilisation d'un tel dispositif se heurte à des difficultés pratiques. Il faut placer le tube dans une position rigoureusement verticale. Le flotteur doit être bien centré et le

contre-poids exactement adapté. Ces conditions de bon fonctionnement se prêtent mal à un changement de liquide. Ce régulateur, dont la sensibilité peut être considérablement augmentée par l'emploi d'un diamètre de poulie plus faible, ou d'une aiguille plus longue, ne présente pas un grand intérêt pratique. Les mêmes conditions d'emploi régissent également le fonctionnement d'un régulateur du type 3 (fig. 10), dans lequel le flotteur agit à l'extrémité d'un fléau équilibré. Dans ce cas, il faudrait utiliser un dispositif de balance hydrostatique et le réglage de la température s'obtiendrait au moyen de la crémaillère. Nous ne retiendrons pas non plus un tel dispositif.

C. — RÉGULATEURS MIXTES.

Afin de réaliser un appareil d'utilisation commode, nous avons imaginé un dispositif mixte, dans lequel le niveau du mercure est maintenu constant jusqu'au moment de l'utilisation, puis lorsque la température voulue est atteinte, on fait agir ces variations sur un levier. On

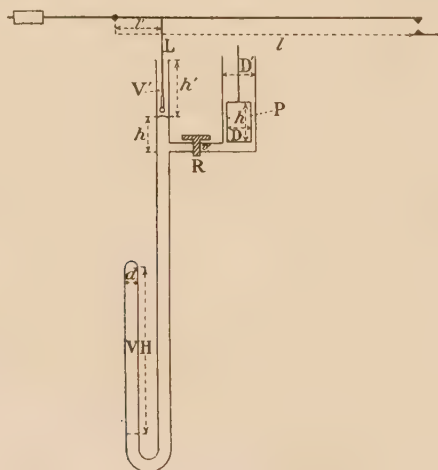


FIG. 11. — Régulateur mixte.

voit, dans ce cas, que l'échelle utilisable sera la même que celle du fonctionnement à pression constante, tandis que, la sensibilité sera celle du fonctionnement à pression variable. Malgré cela, ce dispositif est intéressant par suite de sa facilité d'emploi. En voici le schéma de principe (fig. 11) :

Pendant le chauffage, le piston P est maintenu au sommet de sa course. Le robinet R étant ouvert, le mercure passe dans le vase latéral où il atteint le même niveau que dans le tube. Lorsque la température désirée est atteinte, on fait descendre le piston jusqu'à ce que le mercure agisse sur le flotteur. A ce moment, on ferme le robinet R et le niveau du mercure est alors définitif et stable. Une légère augmentation de température agira sur le flotteur et coupera le courant de chauffage. C'est en somme, le procédé FERGUSON (44) adapté à notre dispositif.

Une étude expérimentale de ce système nous a montré que le flotteur était à rejeter : sous l'effet de la poussée du mercure, il obéit dès qu'il est touché, mais sa partie inférieure ne pouvant être plus lourde que le liquide dans lequel il plonge, il tend à flotter et s'incline. Il vient ainsi toucher les parois du tube et devient beaucoup moins sensible par suite des frottements. Pour pouvoir utiliser ce moyen de transmission, il faudrait que le centre de gravité du flotteur soit placé très bas, ce qui pourrait être réalisé en donnant à ce flotteur une grande section et une faible hauteur. Mais, dans ce cas, il faudrait un centrage rigoureux dans le tube, où se déplace le mercure afin d'éviter les phénomènes de capillarité. Nous avons également rejeté la solution du tube rodé formant piston, couissant exactement dans le tube principal : sous l'effet du poids à soulever le mercure s'infiltre dans la partie rodée et, au bout d'un court temps de fonctionnement, le piston ne suit plus exactement le déplacement du mercure. Un faible déplacement du fléau étant suffisant pour obtenir une rupture ou un établissement de contact, nous avons adopté la poussée sur une tige fixée perpendiculairement au fléau. Nous avons employé à cet effet une tige de cuivre recouverte à une de ses extrémités par un tube de verre destiné à éviter le contact mercure métal. Après de multiples essais, nous avons donné à l'extrémité de ce tube la forme sphérique, car c'est elle qui présente le moins de résistance de déplacement à la surface du ménisque.

E. — Calcul de l'appareil.

Nous allons maintenant, calculer les dimensions des différentes parties du régulateur, en, prenant comme exemple, l'utilisation d'un tube dans lequel on a $H = 25$ centimètres $h = 15$ centimètres et dont la section est de 1 cm^2 .

a) *Calcul du fléau.*

Si nous admettons suffisant un déplacement de 2 millimètres pour assurer une rupture nette du contact (ceci à cause des trépidations pouvant être apportées par le moteur de l'agitateur), si nous prenons une longueur l de 25 centimètres, nous voyons que, pour obtenir une précision de $1/50$ ème de degré, nous devons avoir par degré un déplacement de $50 \times 0,2 = 10$ centimètres. Or, le déplacement correspondant du mercure dans le tube est d'environ 1 cm. 5. Nous devons donc avoir $\frac{l'}{l} = \frac{1,5}{10}$ ce qui nous donnera dans le cas étudié $l' = 3$ cm. 75.

D'autre part, un déplacement de 2 millimètres à l'extrémité du fléau de 25 centimètres représente un angle de $0^{\circ}5$.

Si la tige plongeante a une longueur L de 5 centimètres, cette tige décrira pour ce déplacement, un arc de 0,043 cm. Le déplacement de la tige à la surface du mercure est donc très faible (quelques dixièmes de millimètres). Cependant, pour éviter toute action capillaire, il sera préférable de bien centrer la tige dans le tube.

b) *Calcul du régulateur de niveau.*

Soit V le volume du piston plongeur, D son diamètre et h sa hauteur on a $V = \frac{\pi D^2}{4} \times h$ (1).

Si d est le diamètre du tube, h sa hauteur, le volume du mercure déplacé sera $\frac{\pi d^2}{4} \times H$ (2).

Il est égal au volume V du piston.

Soit h' la distance du niveau actif du mercure à l'extrémité supérieure du tube, le volume de mercure correspondant sera :

$$\frac{\pi d^2}{4} \times h' = V' \text{ (3).}$$

Supposons le piston tout en bas de sa course, et soit D' le diamètre du réservoir et v' le volume de mercure contenu dans la tubulure entre le robinet et le piston. Pour utiliser l'appareil, le robinet R étant fermé, nous le remplissons complètement de mercure. Nous remplaçons 2 ou 3 cm. ³ de mercure par du liquide actif, nous bouchons, et par retournement,

nous faisons passer le liquide dans la branche fermée. Pour que l'appareil soit réglable dès que la température minima est atteinte, il faut avoir :

$$V' = v' + \left(\frac{\pi D'^2 h}{4} - \frac{\pi D^2 h}{4} \right) (4).$$

Dans le cas envisagé, où $\frac{\pi d^2}{4} = 1 \text{ cm.}^2$ et $H = 25 \text{ centimètres}$ on voit que $V = 25 \text{ centimètres cubes}$. Si $h = 5 \text{ centimètres}$ on tire de l'équation (4) la valeur D .

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}} = 2 \text{ cm.} 5.$$

Si nous voulons un jeu de 1 millimètre autour du piston on aura $D' = 2 \text{ cm.} 7$. Admettons que $v' = 2 \text{ cm.}^3$ on tirera de l'équation (4) $V' = 6,08 \text{ cc.}$

En reportant cette valeur dans l'équation (3) on a $h' = 6 \text{ cm.} 08$.

Donc, les conditions cherchées seront réalisées si l'appareil répond aux dimensions suivantes :

$d = 1 \text{ cm.}^2$	$h' = 6 \text{ cm.} 08$	$h = 5 \text{ cm.}$
$H = 25 \text{ cm.}$	$D' = 2 \text{ cm.} 7$	$D = 2 \text{ cm.} 5$
	$v' = 2 \text{ c. c.}$	

F. — Réalisation.

L'étude comparative de différents systèmes nous a amené à adopter le dispositif représenté par les figures 12 et 13. Il comprend trois pièces principales :

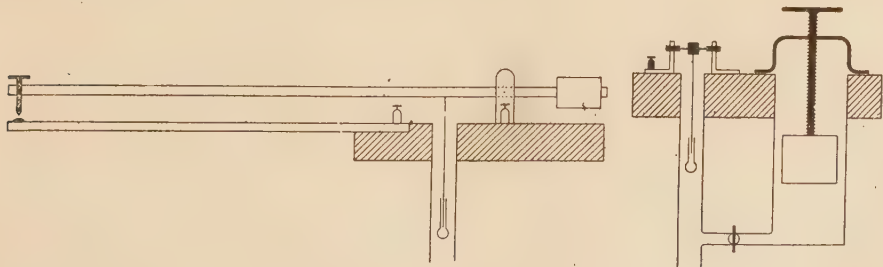


FIG. 12 et 13. — Réalisation d'un régulateur mixte à tension de vapeur.

1° Le tube régulateur proprement dit avec sa cuve destinée au réglage du niveau;

2° Une pièce en matière isolante percée de deux trous où viennent s'engager et se fixer le tube et la cuve. Une butée assure l'obtention d'une position relative de ces deux pièces toujours identiques.

Cette pièce supporte en outre :

a) Une tige de cuivre portant à son extrémité le contact fixe, constitué par un petit morceau de tungstène fixé sur une vis qui permet d'obtenir le contact pour une position horizontale du fléau. Une borne permet de relier électriquement ce contact au circuit d'utilisation;

b) Le support du fléau constitué par deux équerres supportant soit des plans soit des tourillons et muni également d'une borne;

c) Le piston de réglage muni de sa vis et de son support.

3° Le fléau mobile soit au moyen de couteaux soit autour d'un axe. Il porte d'un côté la tige plongeant dans le tube et un contact de tungstène placé à l'extrémité, de l'autre une masse équilibrante dont le déplacement permet de faire varier la pression de contact qui est fonction des intensités du courant utilisé.

Ce dispositif présente comme principal avantage de permettre le changement facile du liquide actif sans entraîner de modifications de conditions de fonctionnement, les différents organes le constituant se trouvant placés automatiquement dans des conditions de fonctionnement identiques.

G. — Correction des variations de la pression atmosphérique.

Les appareils que nous avons décrits ne comportent pas de dispositifs corrigeant l'influence des variations de pression atmosphérique. Dans la plupart des conditions expérimentales, les écarts de température dus à ces variations sont en effet négligeables. Exception faite des dépressions orageuses, les variations de pression sont très lentes et pour des expériences de courte durée leur influence pour la constance de la température est si faible qu'elle ne semble pas nécessiter, pour beaucoup de mesures courantes, l'installation de dispositifs spéciaux. Cependant, les exigences d'expérience peuvent nous obliger à maintenir constante la température de l'enceinte pendant un temps suffisamment long pour nous faire envisager les moyens susceptibles de remédier à cette cause de mauvais fonctionnement. Les solutions possibles sont de deux sortes : Elles peuvent avoir pour but : soit d'éliminer l'action de la pression atmosphérique sur le régulateur, soit de compenser exactement les effets dus aux variations de ce phénomène. Les dispositifs que nous avons :

précédemment étudiés ne peuvent être soustraits à la pression atmosphérique. Ils comportent tous en effet une surface à l'air libre. Seuls des systèmes compensateurs peuvent leur être appliqués car, il est difficile d'envisager pratiquement d'enfermer tout le système préalablement réglé dans une enceinte hermétiquement close.

Dans les régulateurs du premier type (à pression constante) cette compensation peut être exactement obtenue. Il suffit pour cela de reprendre les dispositifs d'ESCLANGON (68), c'est-à-dire de placer sur la partie du fléau opposée au réservoir de mercure en relation avec le régulateur et à égale distance du couteau central, un autre réservoir de mercure communiquant avec un tube barométrique normal de section égale à celle du tube du régulateur.

Dans les régulateurs à pression variable, la réalisation de la compensation est plus délicate. Cependant, dans le type « baromètre à cadran » on peut déplacer le contact fixe en le fixant à l'extrémité d'un levier égal à celui du régulateur et commandé au moyen d'une poulie de même diamètre par un tube barométrique. Dans le type « à fléau équilibré » le problème peut être résolu au moyen d'un baromètre enregistreur dont on calcule la longueur du levier portant le contact fixe en fonction des caractéristiques du fléau commandé par le régulateur. Comme on le voit, ces dispositifs parfaitement réalisables entraînent cependant un encombrement assez important et une mise au point souvent délicate. Nous avons pensé qu'il pourrait être intéressant non pas de compenser une variation de pression mais de tenir compte de leur valeur pendant la durée de l'expérience. Il est possible en effet, pour un régulateur de dimension déterminée de calculer la variation de température provoquée par une différence de pression atmosphérique donnée. Au moyen d'un baromètre enregistreur on détermine la pression atmosphérique moyenne pendant la durée de l'expérience. Connaissant la pression atmosphérique et la température de régulation correspondante au début de l'expérience, on peut en déduire avec exactitude la température moyenne obtenue pendant toute sa durée. Ce calcul mathématique pouvant dans certains cas, présenter quelques difficultés, les conditions expérimentales pouvant exiger une température rigoureusement fixe, nous avons songé à modifier les dispositifs déjà décrits pour éliminer l'action de la pression atmosphérique. Les dispositifs à pression variable se prêtent particulièrement bien à cette adaptation. Une solution très simple consisterait en ce qui concerne le chauffage électrique à établir un contact au moyen du mercure entre les fils conducteurs traversant le tube de verre à la hauteur du flotteur. Le niveau serait établi par le dis-

positif déjà décrit. La partie supérieure du tube recevrait au moyen d'un joint rodé, une ampoule de verre fermée à son sommet par un robinet. Ce dernier ouvert pendant le réglage à la température désirée, serait fermé lorsque cette température serait atteinte, isolant ainsi le régulateur de l'atmosphère. Ce dispositif aurait cependant l'inconvénient d'avoir une sensibilité moindre et d'être sujet au dérèglement provenant des crasses dues aux étincelles. Ces raisons nous ont amené à envisager l'utilisation d'une cellule photoélectrique sur laquelle agirait un rayon lumineux susceptible d'être interrompu par la colonne de mercure. Un tel système, adapté à l'appareil que nous venons de décrire, permettrait de se soustraire à l'action perturbatrice des variations de pression atmosphérique, sans entraîner l'apparition de nouvelles causes d'erreur. Nous nous proposons de reprendre dans un prochain travail l'étude d'une modification de ce genre, capable de satisfaire aux conditions expérimentales les plus rigoureuses.

H. — Résultats obtenus.

Nous avons comparé les courbes de régulation obtenues dans les mêmes conditions expérimentales au moyen du régulateur étudié et d'un régulateur à dilatation gazeuse de même sensibilité, réglés au préalable pour la même température. Dans les conditions de puissance calorifique, d'isolement et d'agitation réalisées, les variations observées nous ont permis de tracer les courbes ci-contre. Leur examen nous montre que le régime de régulation est de l'ordre de 0°7 et la température moyenne de 37°65. Ce régime est atteint en quarante minutes avec notre régulateur. Avec le régulateur à dilatation gazeuse nous n'avons pas accompli dans le même temps la moitié d'un cycle de régulation. L'écart entre les premiers maxima et minima observés est de 1°4 pour notre régulateur et 4°15 dans l'autre cas. Au cours du premier cycle, la température moyenne obtenue avec notre appareil, est de 37°8, très voisine de la température moyenne de régime, tandis que pour le régulateur à dilatation, elle est de 40°17, soit plus élevée d'environ 2°5. Ayant prolongé dans ce dernier cas l'étude des variations de température, nous avons constaté qu'au bout de huit heures de fonctionnement, le régime normal n'était pas encore atteint et nous avons noté alors, une différence de 1°4 pour une température moyenne de 38°2. Ces résultats nous montrent la supériorité au point de vue vitesse d'équilibrage thermique de notre dispositif sur les régulateurs à dilatation (fig. 14).

Un long usage nous a permis de constater que le mode de réglage du niveau du mercure était sûr et précis. Enfin, le fonctionnement du régulateur n'est pas influencé par les étincelles de contact et de rupture. Pour des mesures de grande précision, il y aura lieu d'éviter les trépidations apportées par le moteur de l'agitateur, ce que l'on réalisera facilement par l'emploi de semelles en caoutchouc.

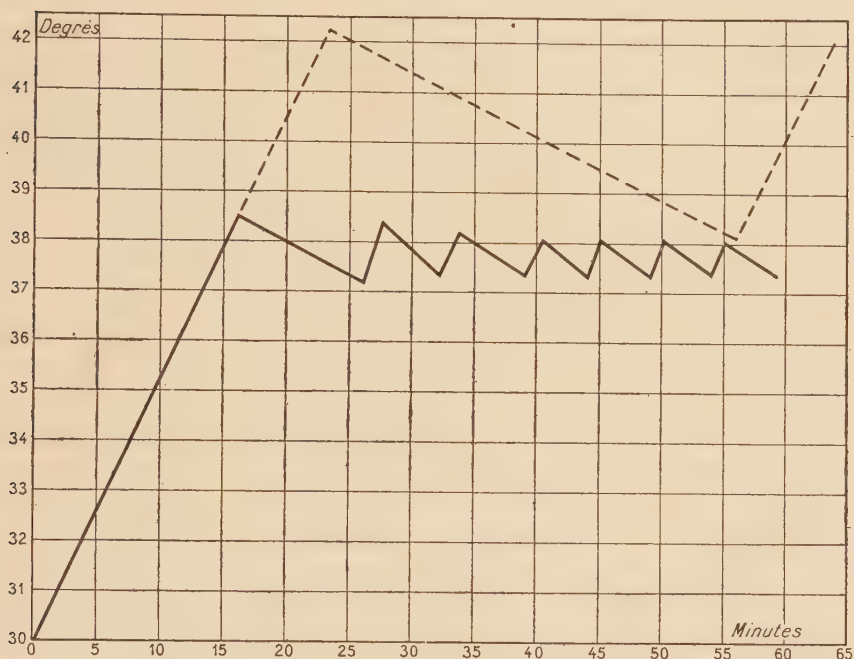


FIG. 14. — Courbes de régulation.

—— Avec notre régulateur.

----- Avec un régulateur à dilatation de même sensibilité.

Le seul reproche que l'on peut faire à cet appareil est d'être sensible aux variations de pression atmosphérique, mais nous avons vu que dans bien des mesures, ces variations étaient négligeables et, nous avons indiqué comment, dans des expériences de longue durée, il était possible d'y remédier.

En résumé, l'appareil réalisé nous paraît par ses propriétés, susceptible d'être avantageusement utilisé pour l'obtention rapide, précise et sûre de température constante.

CHAPITRE III

DISPOSITIFS THERMOSTATIQUES

A. — Généralités.

Au cours des précédents chapitres nous avons étudié les différents constituants d'un ensemble thermostatique. Nous allons maintenant chercher à établir une méthode générale nous permettant, en donnant à chacun de ces facteurs une valeur relative convenable, la réalisation d'un système stable dans des conditions de sensibilité maxima.

Nous avons en effet constaté dans la dernière expérience que nous venons de réaliser, qu'un régulateur sensible au $1/50^{\text{e}}$ de degré nous a donné, dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placés, une température de régime constante à $0^{\circ}7$ près. Nous en concluons que le régulateur n'était pas placé dans les meilleures conditions de fonctionnement et que d'autres causes agissaient défavorablement sur l'écart de températures. Pour mettre en évidence ces influences contraires, nous avons réalisé l'expérience suivante. Nous étant placé dans des conditions particulièrement bonnes, nous avons réglé notre régulateur de manière à obtenir une température moyenne de 45° , température que nous avons maintenue constante à $1/10^{\text{e}}$ de degré près. Nous avons ensuite fait fonctionner le régulateur ainsi réglé dans une enceinte quelconque et, après avoir obtenu le régime de fonctionnement, nous avons construit la courbe représentant un cycle complet de régulation, en notant également les températures et les temps de rupture et de contact du régulateur. Nous avons obtenu les chiffres suivants qui nous ont permis d'établir la courbe (fig. 15) :

TEMPS EN MINUTES	TEMPÉRATURE
0	$45^{\circ}7$
2	$44^{\circ}7$
2,2	$44^{\circ}6$ Contact
3	$44^{\circ}4$
4	$45^{\circ}1$
4,6	$45^{\circ}7$ Rupture
5	$46^{\circ}1$
5,2	$46^{\circ}2$
6,5	$46^{\circ}2$
7,5	$45^{\circ}7$

L'examen de cette courbe nous montre que dans ces nouvelles conditions d'emploi, l'écart de température obtenu est de $1^{\circ}8$. Sur cet écart la différence imputable au fonctionnement du régulateur est celui compris entre les températures de contact et de rupture soit $1^{\circ}1$. Nous constatons en outre un écart de $0^{\circ}5$ entre la température de rupture et la température maxima. Cet écart est dû à la répartition dans la masse de la chaleur emmagasinée dans la résistance au moment de la rupture. Quant à la différence de $0^{\circ}2$, enregistrée entre la température minima et celle de contact, elle provient du temps que met la résistance chauffante à atteindre sa température de régime. Comment porter remède à ces différentes causes de mauvaise sensibilité? Envisageons d'abord la différence de température provenant du fonctionnement du régulateur lui-même. Cette différence est la somme de deux écarts, causés

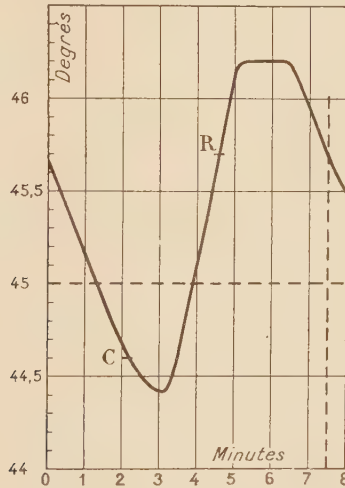


FIG. 15. — Cycle de régulation obtenu avec un régulateur sensible au $1/10^{\circ}$ de degré, placé dans de mauvaises conditions de fonctionnement.

par l'inertie calorifique du régulateur l'un pendant la période de chauffe $0^{\circ}7$, l'autre pendant la période de refroidissement $0^{\circ}4$ et correspondant à un retard de fonctionnement d'environ quarante secondes. On pourra atténuer sa valeur en augmentant l'isolement et en diminuant la puissance calorifique de la source, ce qui, nous l'avons vu, aura pour effet de diminuer la pente des branches de la courbe.

Considérons maintenant l'écart compris entre la température maxima et celle de contact. Pendant la période de chauffe, la résistance est portée à une température d'autant plus élevée que l'intensité du

courant et par suite la puissance calorifique sont plus grandes. Au moment où le courant est interrompu, elle n'est pas au même niveau thermique que le fluide de l'enceinte et continue à lui céder de la chaleur en quantité proportionnelle avec sa masse, sa chaleur spécifique et sa température de fonctionnement. Pour une résistance donnée, cet écart sera d'autant plus grand que la température de fonctionnement sera plus élevée. On cherchera à la diminuer en agissant sur la puissance calorifique de la source que l'on réduira le plus possible.

Enfin remarquons que la différence entre la température minima et celle de contact, correspondant à la perte de chaleur pendant le temps que met la résistance chauffante à atteindre sa température de fonctionnement, sera de son côté amoindrie si l'on réalise un meilleur isolement. Ces remarques nous montrent que l'on a toujours intérêt à réaliser l'isolement le meilleur et à utiliser une faible puissance calorifique. Les conditions expérimentales des mesures que l'on veut effectuer à température constante réduisent souvent les possibilités de bon isolement. On s'efforcera donc d'obtenir le meilleur isolement possible et il ne nous restera plus comme variable que la puissance calorifique.

B. — Courbe d'Echange thermique.

a) *Etablissement.* — Une étude rationnelle des échanges calorifiques de l'ensemble thermostatique va nous permettre de déterminer les valeurs de cette puissance compatible avec un bon fonctionnement.

Etant donnés une température de régulation, un ensemble thermostatique comprenant une résistance chauffante, un régulateur et une enceinte, nous allons établir la courbe qui traduit les échanges thermiques jusqu'à une température supérieure d'environ 15° à la température désirée. Nous considérons en effet que dans la plupart des mesures la température extérieure ne subit pas des variations supérieures à cet écart.

Nous notons la température ambiante, la température initiale de l'enceinte, l'intensité, le voltage et la résistance utilisés. Puis nous établissons le courant et nous notons les temps et les températures croissantes correspondantes. Lorsque nous avons atteint une température supérieure de 15° à la température de régulation nous coupons le courant et nous notons ensuite de la même manière les températures descendantes jusqu'à l'obtention d'une température inférieure de 15° à la température désirée. Nous obtenons une courbe comme celle repré-

sentée ci-dessous. Nous allons en déduire l'intensité du courant qui fournira la puissance calorifique exactement nécessaire pour maintenir constante la température de l'enceinte, lorsque la température extérieure a une valeur déterminée. La courbe a été établie pour une tempé-

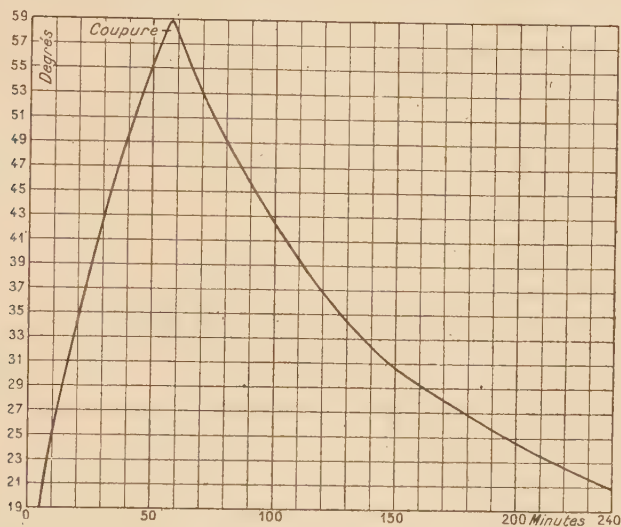


FIG. 16. — Courbe d'échange thermique.

rature ambiante de 9°, l'intensité du courant était de 2,45 ampère pour une force électromotrice de 100 volts correspondant à une résistance de 40,80 ohms. Nous avons obtenu les chiffres suivants qui nous ont permis de construire la courbe (fig. 16) :

TEMPS EN MINUTES	TEMPÉRATURE EN DEGRÉS
0	16 ⁰⁸
5	19 ⁰
10	24 ⁰
15	29 ⁰
20	33 ⁰⁴
25	38 ⁰
30	42 ⁰
35	45 ⁰⁸
40	49 ⁰
45	52 ⁰
50	55 ⁰
53,5	57 ⁰
55,5	58 ⁰ Coupure
57,5	58 ⁰⁸
59	58 ⁰⁵

TEMPS EN MINUTES	TEMPÉRATURE EN DEGRÉS
60	58°
67	55°
79	50°
87	47°
99	43°
105	41°
115	38°
127,5	35°
155	30°
170	28°
200	25°
219	23°
228	22°
238	21°

b) *Utilisation.* — Supposons que nous désirions maintenir l'enceinte à la température de 40°, la température de l'ambiance étant 9°. Nous allons reproduire à une plus grande échelle les parties ascendante et descendante de la courbe entre 38° et 41°. Nous obtenons ainsi les courbes (fig. 17).

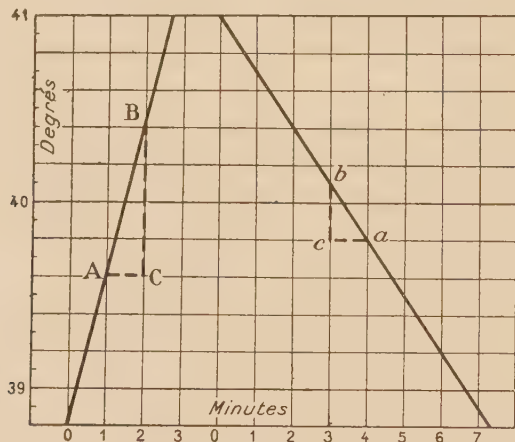


FIG. 17. — Utilisation de la courbe d'échange thermique.

Considérons l'effet de la source calorifique utilisé pendant une minute lorsque la température de l'enceinte est voisine de 40°. A ce moment, la source sert d'une part à compenser la perte de chaleur de l'enceinte, d'autre part à en élever la température. La surface du triangle abc est proportionnelle au nombre de calories minutes employées à la compensation; celle du triangle ABC à la quantité de chaleur utilisée pour l'élévation de température dans le même temps. Soit Q le nombre

total de calories minutes produites, q celui des calories minutes de compensation, q' celui des calories minutes d'élévation et par M la masse à échauffer. On aura $Q = q + q'$ (1).

Or $q = M \times bc$ et $q' = M \times BC$

On peut donc écrire $Q = M (bc + BC) = M bc (1 + \frac{BC}{bc})$ (2).

Or $M bc$ est justement le nombre de calories minutes compensant exactement les pertes. Il peut s'exprimer, si l'on appelle i l'intensité du courant correspondant à ce nombre et R la valeur de la résistance par la formule $A R i^2 \times 60$. De même le nombre de calories minutes totales est donné par l'expression $A R I^2 \times 60$, si I représente l'intensité du courant de chauffage.

Il vient donc $A R I^2 \times 60 = A R i^2 \times 60 (1 + \frac{BC}{bc})$.

D'où l'on tire $i = \frac{I}{\sqrt{1 + \frac{BC}{bc}}}$ (3).

Dans l'exemple choisi on a $BC = 40$ divisions

$bc = 15$ divisions

$I = 2,45$ ampères

On trouve ainsi

$i = 1$ amp. 289

Cherchons maintenant l'intensité du courant de compensation lorsque la température de l'ambiance est de 20° . Nous avons admis et l'expérience a confirmé que les pertes, étant fonction de l'écart compris entre la température ambiante et la température réalisée, seraient identiques si ces deux températures étaient d'une part 20° et 40° et d'autre part 9° et 29° . Nous avons donc cherché par le même procédé l'intensité du courant compensant les pertes du système porté à une température de 29° , la température ambiante étant de 9° . Nous avons trouvé que dans

ces conditions on a $i = \frac{2,45}{\sqrt{1 + \frac{50}{3}}} = 0$ amp. 58.

Un même raisonnement nous montre que si la température ambiante est -2° , l'écart étant alors de 42° , il faudra considérer les courbes

pour la température de 51° et l'on obtient alors $i = \frac{2,45}{\sqrt{1 + \frac{25}{25}}} = 1,73$

ampère.

Connaissant la valeur R de la résistance employée, il est facile de déterminer la résistance r à ajouter en série dans le circuit pour obtenir l'intensité i . La loi d'Ohm nous donne $r = \frac{E}{i} - R = R \left(\frac{I}{i} - 1 \right)$ (1) ou en remplaçant i par sa valeur ou $r = \left(\sqrt{\frac{Bc}{bc} + 1} - 1 \right) R$ (2).

Les valeurs de r et de i permettront de calculer le rhéostat susceptible d'être utilisé dans ce but.

La courbe d'échange thermique nous permet en outre de déterminer la valeur en eau de l'ensemble thermostatique.

Nous avons écrit page 85 l'expression (2) :

$$Q = M (BC + bc)$$

La loi de Joule nous donne : $Q = A.E.I \times 60$

$$\text{On en déduit } M = \frac{A.E.I \times 60}{BC + bc}$$

Cette formule nous donne la valeur calorifique de l'ensemble aux erreurs de calcul et d'expérience près. Dans le but de réduire ces dernières il est bon de prendre pour $(BC + bc)$ une valeur moyenne obtenue en considérant plusieurs régions de la courbe. Dans l'exemple cité on a

$$BC + bc = 1^\circ \text{ et } M = \frac{100 \times 2,45 \times 60}{4,18 \times 1} = 3516.$$

Après la coupure la température a monté pendant trois minutes de $0^{\circ}8$ puis dans le même temps elle a baissé de $1^{\circ}3$. La chaleur emmagasinée dans la résistance est donc égale à $3.516 \times 2,1 = 7.383$ calories. Nous avons d'autre part, par une mesure calorifique, déterminé la valeur en eau de la résistance chauffante. Soit 20 cette valeur. Nous en déduisons la température de fonctionnement de la résistance $\frac{7383}{20} = 369^{\circ}$ environ. Nous avons vu que la chaleur perdue par l'enceinte pendant une minute était égale à $M \times bc$ et le courant susceptible de compenser cette perte doit avoir une intensité i satisfaisant l'égalité :

$$A R i^2 \times 60 = M \times bc.$$

$$\text{On en tire } i = \sqrt{\frac{M \times bc \times 4,18}{R \times 60}} = \sqrt{\frac{M \times 4,18 \times bc}{R \times 60}} \quad (3).$$

Si nous appliquons cette formule à l'exemple étudié nous avons

$$i = \sqrt{\frac{3.516 \times 4,18 \times bc}{40,80 \times 60}} = \sqrt{6 \times bc}.$$

Cette expression nous donne en remplaçant bc par sa valeur les intensités correspondantes aux déterminations antérieures. Nous trouvons ainsi :

1,34	au lieu de	1,29	précédemment trouvé.
0,6	—	0,58	—
1,73	—	1,73	—

c'est-à-dire des chiffres identiques aux erreurs de mesure et de calcul près.

La connaissance de M nous permet également de calculer l'intensité susceptible de nous donner une allure de chauffe déterminée. Supposons que nous désirions faire monter la température de l'enceinte de $0^{\circ}1$ par minute, cette température étant d'environ 20° supérieure à l'ambiance, la chaleur à fournir par minute sera égale à la chaleur perdue pendant le même temps plus $M \times 0,1$. On devra donc avoir dans ce cas :

$$A R i^2 \times 60 = M (bc + 0,1)$$

Dans l'exemple choisi on a

$$i = \sqrt{\frac{M \times 4,18}{40,80 \times 60} (bc + 0,1)} = \sqrt{6 \times (0,06 + 0,1)} = 0,98 \text{ ampère.}$$

En faisant varier l'intensité de 0,58 ampère à 0,98 ampère on peut au moyen d'un rhéostat bien calculé faire varier micrométriquement la température de 0 à 0,1 degré par minute ce qui peut nous permettre de déterminer avec précision la température exacte à laquelle le phénomène étudié s'accomplit (point de fusion par exemple).

C. — Courbe d'écart.

Nous avons vu que la température maxima atteinte était d'autant plus différente de la température de coupure que la température de fonctionnement et la masse calorifique de la résistance étaient plus élevées. Un raisonnement simple nous montre que cet écart est d'autant plus important que l'isolement est meilleur ou que la température de régulation est voisine de la température ambiante.

Pour l'ensemble thermostatique étudié, une expérience préliminaire permettra de noter les valeurs de cet écart pour des différences de tem-

pérature de 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, etc. La courbe en résultant nous indiquera à quelle température il faudra couper le courant de chauffage pour obtenir d'emblée la température de régulation désirée.

Écart avec la température ambiante			10°	20°	30°	40°	50°
	Isolément	Puis. Cal					
Écart entre	Très bon	Faible	0°3	0°3	0°3	0°3	0°3
coupure et	Très bon	Forte	0°9	0°9	0°9	0°9	0°9
maximum	Mauvais	Forte	0°8	0°4	0°2	0°1	0°05

Les résultats expérimentaux ci-dessus nous ont permis de dresser les courbes de variations de cet écart en fonction de la température ambiante en utilisant des conditions d'isolement et de puissance calorifique différentes fig. 18. Cette étude nous montre que dans le cas

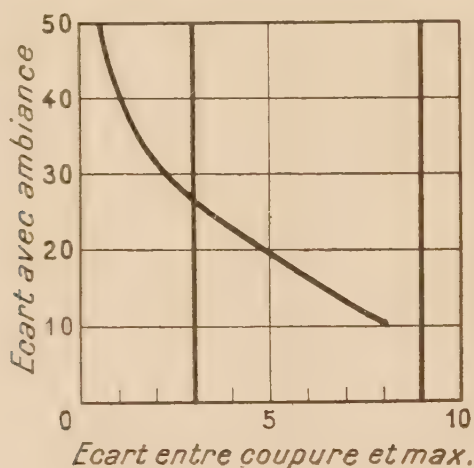


FIG. 18. — Courbe d'écart.

d'un très bon isolement, la valeur de cet écart est constante et qu'une seule mesure permet de la déterminer. Au contraire si l'isolement thermique est mauvais, elle diminue à mesure que l'on s'élève au-dessus de la température ambiante.

Cette étude nous montre tout l'intérêt que présente la construction des courbes d'échanges thermiques et d'écart entre les températures maxima et de coupure. On l'effectuera avec précision en relevant les températures minute par minute avec un thermomètre sensible, les résultats ainsi obtenus se prêtant particulièrement aux calculs que l'on sera amené à faire ultérieurement.

D. — Réglage de la Puissance Calorifique.

a) *Principe.* — Pour une source d'énergie électrique déterminée, le choix de la puissance calorifique entraîne celui de la résistance et du rhéostat.

La résistance totale de ce dernier sera d'autant plus grande que la puissance calorifique minima sera plus faible et que la puissance calorifique maxima sera plus élevée. Pour ne pas être amené à construire des rhéostats encombrants et coûteux, il faut s'efforcer à n'avoir besoin que d'une faible puissance calorifique ce qui vient limiter les possibilités expérimentales du dispositif. Il faut donc établir un compromis entre ces différents facteurs. Pratiquement pour un courant de 110 volts l'in-

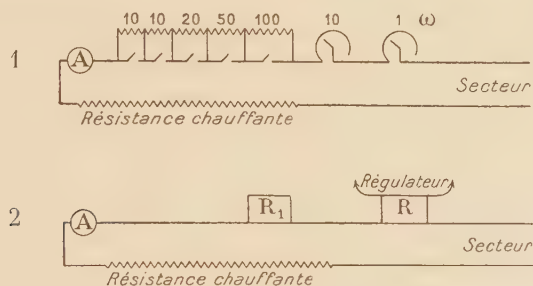


FIG. 19. — Réglage de la puissance calorifique.

- 1 Sans régulateur.
- 2 Avec régulateur.

tensité maxima ne doit pas dépasser 4 ampères lorsque l'on utilise des enceintes de dimensions moyennes (jusqu'à 30 litres) assez bien isolées à des températures inférieures à 150°. Remarquons enfin que la valeur du rhéostat est fonction de celle de la résistance chauffante et que la facilité du réglage sera plus grande si cette dernière est élevée ce qui, pour une source d'électricité donnée correspond à une puissance calorifique moindre. La puissance calorifique minima nous permet de calculer la valeur totale du rhéostat. Afin d'obtenir une grande sensibilité sous un faible encombrement, nous recommandons une commande mixte par plots ou fiches et manettes. Les plots ou les fiches court-circuitent des résistances de valeurs croissant comme celles des boîtes de poids, 10 ω 20 ω 20 ω 50 ω 100 ω , etc.; une manette commande un rhéostat de 0 à 10 ω . Enfin, pour des réglages très précis, on peut envisager l'emploi d'une manette permettant d'ajuster la valeur totale à 1/50^e d'ohm près.

Un ampèremètre dont la sensibilité est fonction de la précision désirée sert de contrôle. Le dispositif complet se présente suivant le schéma (fig. 19-1) :

L'utilisation d'un régulateur oblige à employer deux rhéostats identiques suivant le montage (fig. 19-2). Le régulateur courtcircuite le rhéostat R dont la valeur est égale à la différence des deux résistances d'entretien, tandis que R' est égal à la résistance d'entretien la plus faible.

b) *Réalisation pratique.* — Comme exemple, nous allons décrire le rhéostat que nous avons réalisé. Il convient au réglage de la puissance calorifique d'une résistance de 30 à 50 ohms, utilisée sur un secteur 110 volts. La résistance que nous avons employée étant de 40 ohms, 80.

L'intensité maxima est de $\frac{110}{40,8} = 2,69$ ampères correspondant à une puissance calorifique minute de 17.954 calories. Si nous admettons que la puissance calorifique minima que l'on désire réaliser est 1.200 calories minute, on a :

$$i = \frac{1.200 \times 4,18}{110 \times 60} = 0,76 \text{ ampère.}$$

La résistance totale du rhéostat est donc (formule 1, p. 86) :

$$r = 40,8 \left(\frac{2,69}{0,76} - 1 \right) = 103,63 \text{ ohms.}$$

Nous voyons que le fil à utiliser pour la constitution de ce rhéostat est le R. N. C. 4/10 faisant 975 ohms aux 100 mètres. Pour avoir une résistance de 10 ohms, il faut utiliser 1 m. 025 de ce fil. Nous bâtissons un support pour cette résistance au moyen de 4 tiges filetées placées aux 4 coins d'un carré que l'on a tracé sur une plaque de bakélite. Pour éviter une trop longue flèche nous choisissons le côté du carré de telle sorte que deux tours complets correspondent à 10 ohms. Le calcul nous donne $\frac{102,5}{8} = 12,8$ cm. Nous fixons solidement par deux écrous les 4 tiges et nous les garnissons de poulies isolantes en porcelaine. Nous consolidons le support ainsi formé, par une deuxième plaque de bakélite également percée, puis nous enroulons 20 tours de fil résistant. Aux deux extrémités nous soudons un fil de cuivre et nous faisons des prises aux deuxième (10 ohms) sixième (20 + 10 ohms) dixième (20 + 20 + 10 ohms) tours. Ces prises sont en relation avec un jeu de 4 fiches qui permet

de mettre en circuit les résistances allant de 10 à 100 ohms par bond de 10 ohms. Nous nous sommes procuré dans le commerce les rhéostats à curseur de 10 ohms et de 1 ohm, susceptibles de laisser passer 3 ampères en service normal. Ces rhéostats type T. S. F. émission, à large section de contact, nous ont donné toute satisfaction. Un ampèremètre de 0 à 3 ampères complète l'installation. Les fiches de commande les boutons des rhéostats et l'ampèremètre, sont placés sur une plaque de bakélite qui supporte également deux bornes d'arrivée, deux bornes de départ, et une fiche de court-circuit général permettant de supprimer l'effet de toute la résistance. Si l'on utilise un régulateur, un ensemble identique mais sans ampèremètre, devra être ajouté en série. Il comportera en outre, deux bornes qui seront reliées au régulateur. Pour utiliser un tel appareil on calcule la résistance correspondant à l'intensité d'entretien et l'on donne cette valeur au rhéostat. Un coup d'œil à l'ampèremètre avant la période de chauffe, permet de contrôler l'exactitude du calcul. On court-circuite la résistance ainsi réglée. La source donne alors sa puissance calorifique maximum. La courbe d'écart nous a donné la température de coupure. Cette température étant atteinte, on manœuvre la fiche servant d'interrupteur général; on ôte la fiche de la résistance préalablement établie et, quand la température désirée est obtenue, on rétablit le courant au moyen de l'interrupteur général. Si l'on exécute une expérience de longue durée, l'usage du régulateur est indispensable. Dans ce cas, on donne à la résistance la valeur correspondant à l'intensité d'entretien la plus forte, puis on ajoute en série la seconde résistance dont on rend la valeur égale à la différence des deux résistances d'entretien. C'est en court-circuitant cette dernière qu'agit le régulateur.

E. — Utilisation pratique des résultats obtenus.

Etant donné un ensemble thermostatique, on établira les courbes d'échange thermique et d'écart correspondantes. Puis, selon la température désirée et les valeurs maxima et minima de la température ambiante, valeurs qu'une étude préalable des variations thermiques de l'enceinte permet de déterminer, on calculera les intensités i et i' ainsi que les résistances additionnelles r et r' correspondantes à cet écart et l'on branchera le régulateur de façon à le faire agir sur la différence de ces deux résistances. Enfin notant la température ambiante, on trouvera au moyen de la seconde courbe la température de coupure. Ces opérations

préliminaires réalisées, nous branchons le courant directement sur la résistance chauffante. La température de coupure étant atteinte, nous profitons du temps que met l'enceinte à se placer en équilibre thermique pour brancher les résistances et le régulateur qui placé dans des conditions de fonctionnement optima pourra être facilement réglé à la température voulue. Remarquons que, pour des expériences de courte durée, l'emploi d'un régulateur n'est pas indispensable. Car dans ce cas les variations de l'ambiance sont de faible importance et il suffit de calculer l'intensité du courant d'entretien correspondant à l'écart de température entre l'enceinte et l'ambiance au moment de l'expérience.

F. — Quelques exemples d'application.

Nous envisagerons maintenant les applications possibles en nous servant de quelques exemples concrets qui mettront en évidence la généralité de la méthode. Les conditions expérimentales les plus courantes peuvent se classer en deux catégories :

1^o Celles qui permettent d'opérer au sein même du fluide chauffé. C'est par exemple le cas de nombreuses mesures chimiques ou bactériologiques;

2^o Celles dans lesquelles il est impossible de placer dans l'enceinte isothermique tout l'appareillage nécessaire à l'expérimentation. Cette dernière catégorie comprend plus particulièrement les mesures de propriétés physico-chimiques au moyen d'appareil d'usage courant.

Dans le premier cas la résistance chauffante et le matériel expérimental sont tous les deux placés à l'intérieur de l'enceinte. Dans le second on est obligé d'apporter à l'endroit même de la mesure les calories nécessaires au maintien de la température. Ce résultat est obtenu au moyen d'une circulation de fluide chauffé. Certains expérimentateurs ont réalisé des dispositifs de circulation d'eau chaude autour du tube laboratoire où est placée la substance en expérience. Signalons, en particulier, les appareils proposés par PELLET (70), HEYGENDORFF (71) et BECKEL (72) qui, bien que conçus pour le chauffage au gaz peuvent être également utilisés avec le chauffage électrique. Ils se règlent soit par la vitesse d'écoulement, soit par le débit calorifique, soit par un mélangeur d'eau

70. PELLET. — Notice et travaux scientifiques, 1900, p. 86.

71. HEYGENDORFF. — *Chem. Zeit.*, 1909, **33**, 244. •

72. BECKEL (A.). — *Chem. Zeit.*, 1932, **56**, 331/332. ' •

chaude et froide. Ces dispositifs, dans lesquels l'eau chaude n'est pas récupérée, sont calorifiquement coûteux. C'est pourquoi nous leur préférons des dispositifs à récupération, dans lesquels la circulation s'effectue au moyen d'une petite pompe centrifuge actionnée électriquement, analogues à ceux que LECOMTE DU NOUY utilise pour la mesure du pH au moyen de son Ionomètre (11).

Les températures à obtenir sont selon les cas assez variables. Alors que pour les besoins de la biologie et de la bactériologie la température de régulation dépasse rarement 60° et oscille le plus fréquemment entre 35° et 40°, les températures que l'on peut être amené à réaliser au cours d'expériences physiques et chimiques, se répartissent sur une beaucoup plus grande échelle. Nous envisagerons dans le cas des températures inférieures à 60° l'usage de l'eau comme fluide intermédiaire. Au delà de cette température, il faut employer un liquide à tension de vapeur moins élevée, afin d'éviter un dérangement de la régulation par suite de l'évaporation possible. L'huile de vaseline, par exemple, sera particulièrement précieuse dans cette application par suite de sa transparence et de son absence de coloration. Enfin les enceintes à fluides gazeux, moins faciles à stabiliser par suite de la faible chaleur spécifique du fluide qui rend l'ensemble plus sensible aux variations de puissance calorifique et de niveau thermique de l'ambiance, ne seront utilisées que lorsque les conditions expérimentales l'exigeront. Cependant il est possible d'obtenir avec elles des résultats très satisfaisants en appliquant notre méthode, mais, pour les raisons que nous venons d'exposer, il sera nécessaire de réaliser un très bon isolement thermique et d'utiliser des moyens de réglage de la puissance calorifique très sensibles et très précis (rhéostat très progressif et ampèremètre de précision).

Pour les mesures pouvant s'effectuer dans une enceinte, le problème de la régulation sera toujours très facile à résoudre. Il suffira de prendre un récipient dont les dimensions soient proportionnées à l'encombrement du matériel expérimental et de réaliser le meilleur isolement possible. Puis après l'avoir rempli du fluide convenable on y dispose la résistance chauffante et le dispositif d'agitation afin d'obtenir une bonne et rapide répartition de la chaleur. La valeur de la résistance à utiliser sera fonction de la masse du fluide, de sa chaleur spécifique et de la vitesse maxima de chauffe que l'on veut réaliser. On détermine ensuite les courbes d'échanges thermiques et d'écart. On en déduit les propriétés du rhéostat correspondant à l'obtention de la température désirée et s'il en est besoin on branche le régulateur ainsi que nous l'avons précédemment expliqué.

Dans le cas où l'on doit effectuer le chauffage par circulation de fluide chauffé extérieurement, nous avons été appelé à étudier rationnellement le dispositif de chauffage et de circulation. Les pertes pouvant, lorsque l'isolement réalisable est médiocre, atteindre une valeur élevée, surtout si l'on opère à haute température, il sera bon de prévoir une puissance calorifique de la source aussi grande que les conditions de réalisation le permettront. On augmentera ainsi les possibilités expérimentales. Mais, dans ce cas, l'établissement exact de la partie ascendante de la courbe sera plus difficile. Si une très grande puissance calorifique est nécessaire, on aura intérêt à calculer M en construisant une courbe correspondant à une puissance calorifique plus faible. Puis, avec la puissance calorifique maxima, on construira pendant la montée thermométrique la courbe des écarts et l'on établira soigneusement la branche de refroidissement qui nous permettra d'obtenir la valeur exacte de $bc.M$ et bc étant connus, il nous sera facile au moyen de la formule 3, page 86, de calculer l'intensité du courant d'entretien.

La circulation s'effectue au moyen d'une petite pompe centrifuge entraînée électriquement et quelquefois par siphonnage. Deux robinets permettent de régler les débits respectifs de la pompe et du siphon afin de maintenir constants les niveaux du liquide dans les récipients formant le circuit. On s'efforcera de réaliser la plus courte circulation et le meilleur isolement compatibles avec l'expérience.

Le récipient où s'opère le chauffage du fluide doit être très bien calorifugé et l'on disposera judicieusement la résistance chauffante, le régulateur et les tubes d'arrivée et de départ, de manière à réaliser les meilleures conditions de répartition calorifique.

Nous avons utilisé comme récipient de chauffage de l'eau un vase de Dewar d'une capacité de 3 litres; nous avons employé comme élément chauffant une résistance électrique, contenue dans un petit tube de cuivre, recourbé en spirale, d'un diamètre égal à la moitié de celui du vase de Dewar et d'une hauteur égale à celle de l'eau placée dans le récipient; de cette disposition il résulte une bonne répartition de la chaleur produite sur l'eau qui se trouve de plus légèrement brassée par la circulation produite par une petite pompe centrifuge. Afin de rendre ce brassage plus efficace, nous avons fait l'aspiration du liquide chaud par un tube courbé à angle droit, plongeant au fond du vase et placé de telle manière qu'il tende à créer dans le fluide un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que le refoulement s'effectue à la partie supérieure du liquide par un tube semblable, mais disposé de telle sorte que le mouvement ainsi obtenu s'effectue dans le sens inverse de celui

produit par l'aspiration; nous avons de la sorte un brassage latéral du fluide, qui se trouve complété par un brassage vertical, provenant de la rencontre du courant d'eau chaude qui tend à s'élever avec le courant descendant provenant du refoulement par la pompe. Enfin dans le vase est placé notre régulateur, le tube fermé étant placé au centre. Pour supporter tous ces organes, entrée et sortie de la résistance chauffante, tuyaux d'arrivée et de départ de l'eau, régulateur, et pour augmenter l'isolement de l'ensemble, nous avons employé un bouchon de liège de plusieurs centimètres d'épaisseur sur lequel nous avons vissé une planchette de bois. Un thermomètre nous permet de suivre les variations de température.

Nous allons maintenant donner quelques exemples d'applications que nous avons été amené à réaliser.

Mesure du pH.

Afin de donner une base de comparaison aux résultats énoncés, les biologistes se sont mis d'accord pour exprimer la valeur du pH de certains liquides physiologiques à une température égale à celle que possèdent ces liquides dans un organisme vivant. C'est ainsi qu'il a été décidé que le pH du sang serait pris à 38°. Le plus souvent la mesure est faite à la température ambiante et un coefficient de correction permet de calculer la valeur du pH à 38° en fonction de la valeur mesurée. Mais ce coefficient est différent suivant les auteurs. Le moyen le plus simple pour éliminer ce coefficient mal déterminé est d'effectuer la mesure à 38°. Un appareillage spécialement conçu dans ce but a été imaginé par LECOMTE DU NOUY (14) qui lui a donné le nom d'Ionomètre. Les deux électrodes sont entourées par une enveloppe thermostatique permettant d'établir autour d'elles une circulation d'eau chaude. L'électrode d'hydrogène, la plus sensible aux variations de température est située au-dessus de l'électrode au calomel et est animée d'un mouvement de rotation qui lui est transmis par un petit moteur électrique. Un thermomètre permet de noter sa température.

Nous avons appliqué notre méthode à ce dispositif. L'eau était chauffée au moyen du système précédemment décrit comprenant le vase de Dewar, la résistance chauffante, le rhéostat et la pompe de circulation. La mesure étant de courte durée nous n'avons pas envisagé l'emploi du régulateur. Les courbes d'échanges calorifiques et d'écart ont été établies dans les conditions expérimentales suivantes :

Intensité du courant	2,45 ampères
Voltage de la source	100 volts
Résistance chauffante.	40,8 ohms
Rhéostat de commande du moteur de la pompe. .	plot 7
Température ambiante.	17°

Au moment de la mesure la température extérieure était de 19°.

Voulant maintenir constante la température de 38°, nous avons considéré la courbe pour la température de 36°. Voici les coordonnées intéressant cette région :

Branche ascendante :				{	Élévation min. 5 vers 38°	$\frac{5}{4} = 1^{\circ}25$
t min	0	4	8			
T degré	30	35	40			
Branche descendante :				{	Baisse minute 1,75 vers 38°	$\frac{1,75}{7} = 0^{\circ}25$
t min	0	3	7			
T degré	38,8	38	37,05			

On a donc $\frac{BC}{bc} = \frac{1^{\circ}25}{0,25} = 5$

D'où :

$$i = \frac{2,45}{\sqrt{5+1}} = \frac{2,45}{2,45} = 1 \text{ ampère et } r = 40,8 \left(\frac{2,45}{1} - 1 \right) = 59,16 \omega$$

Au moyen des fiches et des manettes nous avons donné au rhéostat cette valeur de 59,16 ohms. La courbe d'écart nous indiquant 1°2, nous avons court-circuité le rhéostat, puis lorsque la température de 36°8 a été atteinte, nous avons interrompu le courant et intercalé dans le circuit le réhostat. Le courant rétabli lorsque la température a atteint 38° nous avons obtenu pendant près d'une heure une température constante de l'électrode d'hydrogène à 1/40° de degré près. Les résultats satisfaisants obtenus nous ont conduit à adapter notre méthode à d'autres mesures. C'est ainsi que pour répondre aux besoins de certaines recherches nous avons été amené à réaliser des enceintes conçues spécialement pour un emploi déterminé.

Mesures des viscosités.

Nous avons en particulier réalisé un viscosimètre universel, permettant d'effectuer avec précision des mesures à n'importe quelle température.

Parmi les viscosimètres utilisés dans les laboratoires, celui de BAUME semble être le plus utilisé par suite de sa grande précision et du peu de liquide nécessaire à une détermination. Il suffit en effet d'avoir à sa disposition quelques centimètres cubes de substance alors que si l'on utilise le viscosimètre ENGLER, il faut au moins en posséder 240 c. c. Or le chimiste ou le biologiste dispose rarement d'une quantité aussi considérable de produit. Nous avons donc cherché à appliquer à l'appareil de BAUME notre méthode de régulation.

Ce viscosimètre est constitué par un tube capillaire surmonté par un petit récipient que prolonge un tube de diamètre ordinaire. Cet ensemble, appelé tube viscosimétrique, est généralement en Pyrex et porte à son extrémité inférieure, à l'entrée et à la sortie du petit réservoir des repères constitués par des petits points d'émail coloré. Ce tube plonge dans un tube de diamètre déterminé contenant le liquide étudié, de façon que ce liquide affleure au repère inférieur. On fait monter le liquide dans le tube viscosimétrique de manière à remplir le capillaire, le réservoir et une partie du tube supérieur. On laisse ensuite le liquide s'écouler et on note le temps correspondant au passage du ménisque devant les deux repères du réservoir. Une formule simple permet d'évaluer la viscosité du liquide étudié soit en unités viscosimétriques C. G. S., soit en degrés viscosité ENGLER, soit en degrés fluidité BARBEY. La viscosité variant dans de grandes proportions avec la température, il importe d'opérer à une température déterminée et maintenue constante pendant toute la durée d'une mesure. Dans l'appareil de BAUME ce résultat est obtenu en utilisant la constance du point d'ébullition de liquides organiques, dont les principaux, éther, chloroforme, benzène, permettent l'obtention de températures fixes comprises entre 0° et 100°. Le dispositif utilisé est celui de la « jaquette ». La vapeur circule autour d'une enceinte contenant le tube laboratoire et va se condenser dans un réfrigérant à reflux.

Une petite quantité de mercure interposée entre la paroi de la jaquette et le tube laboratoire facilite l'équilibrage thermique. L'enceinte est fermée à sa partie supérieure par un bouchon percé de deux trous où l'on place le tube viscosimétrique et le thermomètre. Pour effectuer une mesure, on fait monter le liquide dans le tube viscosimétrique, soit par pression au moyen d'une soufflerie, soit par aspiration. Remarquons à ce propos que ce dernier procédé est préférable car l'emploi de la pression exige l'introduction dans l'enceinte d'une certaine quantité d'air extérieur, ce qui fait varier la température interne juste au moment où l'on effectue la mesure. Parmi les principaux inconvé-

nients, que présente ce mode de chauffage signalons particulièrement la lenteur de la mise en équilibre, qui n'est jamais parfaite. En effet les échanges thermiques s'effectuant par l'intermédiaire du mercure, tendent à échauffer le liquide en expérience tandis que le tube viscosimétrique séparé de la jaquette par deux lames d'air en repos s'échauffe beaucoup plus lentement. Or le thermomètre nous indique la température du liquide contenu dans le tube laboratoire et non la température réelle à laquelle on effectue la mesure. Cette dernière est en général beaucoup plus basse par suite de la température moins élevée du tube. C'est pourquoi l'obtention de résultats précis n'est possible qu'après de nombreux passages du liquide dans le tube viscosimétrique qui ont pour but de favoriser l'égalité de température entre les diverses parties de l'appareil. En général, ce n'est qu'au bout d'une heure environ que l'équilibre thermique étant réalisé, il est possible d'effectuer des mesures sérieuses. Or parfois, surtout en biologie, un chauffage prolongé aux températures de mesure peut modifier sensiblement les propriétés du corps étudié. D'autre part ce mode de chauffage ne permet pas d'opérer à des températures déterminées. On est obligé soit de construire une courbe de viscosité, soit d'interpoler deux résultats obtenus pour obtenir une valeur à peu près exacte de la viscosité du liquide étudié à la température considérée. Si on peut effectuer la mesure à cette température, une seule opération permettra d'obtenir un résultat exact. Ces considérations nous ont amené à réaliser le dispositif suivant :

Un vase de Dewar de un litre, en verre transparent, porte à sa partie supérieure un bouchon percé de trois trous : 1^o Un trou central reçoit un tube de verre ou mieux de quartz transparent de 25 centimètres de long, fermé à son extrémité inférieure et d'un diamètre égal à celui du tube laboratoire de l'appareil de BAUME. Ce tube, coulissant à frottement dur dans le bouchon, est fermé à sa partie supérieure par un bouchon supportant le tube viscosimétrique et le thermomètre. Le tout sera disposé de manière à ce que l'extrémité supérieure du tube viscosimétrique se trouve à l'intérieur du vase de Dewar; 2^o Deux trous latéraux livrent passage aux tubes d'arrivée et de départ de l'eau chaude. L'arrivée se faisant à la partie supérieure et le départ à la partie inférieure. Cet appareil est mis en relation avec le système chauffant précédemment étudié. Le liquide chaud provient du vase de Dewar de trois litres par siphonnage. Il est repris dans l'appareil de mesure par la pompe centrifuge qui le ramène dans le récipient de chauffage. Deux robinets permettent de régler les débits respectifs et de maintenir constant le niveau du liquide dans les différentes parties de l'appareillage.

La chaleur se répartit très rapidement par suite de la grande surface de contact entre le liquide chaud et le tube laboratoire qui y plonge directement et de la faible distance qui sépare le tube viscosimétrique de cette paroi.

Nous avons établi les courbes d'échanges thermiques et d'écart pour ce dispositif dans les conditions expérimentales suivantes :

Intensité	2,45 ampères
Voltage	100 volts
Résistance chauffante.	40,8 ohms
Rhéostat de commande du moteur de la pompe. .	Plot 7
Température ambiante.	10°

Nous avons effectué des mesures de viscosité à 45° la température ambiante étant de 17°. Nous devons donc considérer les courbes pour une température de 38°. Nous avons les coordonnées suivantes :

Pente ascendante :

t min	0	3	6	} Élévation min. 2,1 vers 38° $\frac{\quad}{3} = 0,7$
T degré	35°	37°4	39°5	

Pente descendante :

t min	0	8	16	} Baisse minute 1,4 vers 38° $\frac{\quad}{8} = 0,175$
T degré	39°6	38°2	36°8	

$$\frac{BC}{bc} = \frac{0,7}{0,175} = 4$$

$$\text{On a donc } i = \frac{2,45}{\sqrt{5}} = 1 \text{ ampère } 088$$

$$\text{et } r = 40,8 \times (\sqrt{5} - 1) = 51 \text{ ohms.}$$

La température a pu être ainsi maintenue constante à 1/40 degré près pendant tout le temps de l'expérience et l'équilibre thermique a été obtenu en moins de dix minutes.

Détermination des points de fusion.

Un léger dérèglage du rhéostat nous a permis de faire varier très lentement la température du liquide contenu dans le tube laboratoire et nous avons pu réaliser des vitesses d'échauffement ou de refroidissement de l'ordre du 1/20^e de degré par minute, ce qui nous permet d'envisager l'utilisation d'un tel dispositif pour la détermination des points

de fusion par la méthode du tube capillaire. En remplaçant le tube laboratoire par un tube de plus large section et de petite hauteur rempli de mercure il est possible de réaliser un dispositif pour détermination de point de fusion instantanée de très grande précision. Nous avons de cette façon obtenu une variation de l'ordre du $1/40^{\text{e}}$ de degré par minute.

Étuve et Bain marie.

Nous avons pensé pouvoir nous servir de cet appareillage pour réaliser une étuve ou un bain-marie à température constante. Dans ce cas il faut utiliser le régulateur pour compenser l'effet des variations de la température ambiante. A l'époque où nous avons opéré, la température extérieure variait entre 10 et 17°.

Nous avons vu que, pour cette dernière température, l'intensité d'entretien, 1 amp. 088 était obtenue en ajoutant en série dans le circuit une résistance de 51 ohms si l'on voulait maintenir l'enceinte à 45°.

La courbe ayant été établie la température de 10° son examen dans cette région donne les coordonnées suivantes :

Branche ascendante :

t min	0	3	6	{	Élévation min. 1,8	$\frac{\quad}{3} = 0,6$
T degré	43°1	44°9	46°7		vers 45°	

Branche descendante :

t min.	0	8	16	{	Baisse minute 1,6	$\frac{\quad}{8} = 0,2$
T degré	47°1	45°4	43°8		vers 45°	

$$\text{D'où } \frac{BC}{bc} = \frac{0,6}{0,2} = 3 \quad i = \frac{2,45}{\sqrt{4}} = 1,225 \text{ ampère}$$

$$\text{et } r = 40,8 (\sqrt{4} - 1) = 40,8 \text{ ohms.}$$

On règle le rhéostat pour cette valeur. On branche le régulateur aux bornes du second rhéostat qui a une résistance de $51 - 40,8 = 10,2$ ohms et on ajuste le niveau pour obtenir la rupture à 45° C.

Dans ces conditions nous avons maintenu constante à plus d'un vingtième de degré près la température d'un liquide contenu dans un tube à essai pendant plus d'une journée. Cependant ce dispositif par suite de la présence d'un siphon nécessite une surveillance continuelle. En effet, soit par panne du secteur ou par désamorçage, la pompe peut

ne plus fonctionner. Le récipient où s'effectue le chauffage se vide tandis que le liquide déborde dans le vase de Dewar où s'effectue l'expérience.

Pour éviter ces inconvénients il semble préférable pour les expériences de longue durée d'opérer dans une enceinte unique. Voici un dispositif de chauffage et d'agitation particulièrement simple susceptible de s'adapter à toutes sortes d'enceintes. La résistance chauffante de forme spiralée est située au centre de l'enceinte. Elle est entourée d'un manchon métallique formant cheminée. Une hélice actionnée par un petit moteur électrique est située au bas de ce manchon et tend à y faire remonter le liquide froid placé au fond de l'enceinte. L'agitateur, la résistance et le manchon sont montés sur un même b^{ti} qui peut facilement être fixé sur un support universel. Pour obtenir une bonne répartition de la chaleur, le diamètre du récipient formant enceinte doit être, au plus, le triple de celui du manchon.

G. — La régulation thermique et les sciences expérimentales.

Pour terminer ce chapitre nous allons passer en revue quelques problèmes de régulation de température qui peuvent se présenter dans les différents domaines de la recherche scientifique et nous indiquerons dans chaque cas les moyens qui nous paraissent susceptibles d'être utilisés avec profit.

A. — *Mesures Physiques.*

La plupart des mesures que le physicien est appelé à effectuer sont de courte durée. Elles exigent souvent le chauffage sur place, une grande précision ou une variation lente. Dans ce cas un dispositif à circulation par pompe est recommandé. Il sera bon dans un laboratoire de physique de disposer de deux appareillages, l'un fonctionnant à l'eau pour les températures inférieures à 60°; l'autre à l'huile de vaseline pour les températures supérieures. Nous avons vu comment on pouvait effectuer des mesures de viscosité et de pH et prendre des points de fusion. Quelques légères modifications d'appareillage permettent l'application de ce dispositif à la mesure de pouvoir rotatoire ou d'indice de réfraction. Le tube polarimétrique peut être entouré d'un manchon de circulation de fluide chauffé. De même, il est facile en réglant le débit de la pompe avec celui du trop plein d'établir une circulation dans le bain-marie d'un réfractomètre.

B. — *Recherches Chimiques.*

Dans ces recherches, les expériences sont en général de longue durée et les températures où l'on opère sont le plus souvent élevées. C'est pourquoi une enceinte contenant le dispositif de chauffage et d'agitation sera utilisée avec profit. Le fluide employé sera soit l'huile de vaseline soit des huiles résistant à des températures plus élevées dites huiles pour bains. Une enceinte constituée par un vase de Dewar de 15 litres sera presque toujours suffisante pour y effectuer des expériences de catalyse et d'estérification. Pour le chauffage des tubes scellés, il y a lieu de prévoir une enceinte de forme particulière et plus solide. On pourra par exemple la réaliser par un récipient de forme allongée que l'on isolera thermiquement par une couche d'amiante de plusieurs centimètres d'épaisseur, le tout étant disposé dans une caisse et entouré d'un large bourrage de liège granulé ou de sciure de bois. Le tube sera placé sur deux supports en forme de fourchette de manière à ce qu'il soit entouré de tous côtés par le liquide chaud. On utilisera l'huile qui permet de réaliser une résistance chauffante sans isolement. Celle-ci est disposée sur toute la surface et placée près du fond de l'enceinte. On déterminera sa puissance calorifique maximum suivant le volume du liquide chauffé, l'isolement de l'enceinte et la vitesse de chauffe désirée.

C. — *Recherches biologiques.*

Dans les expériences biologiques, les deux sortes d'appareillages sont nécessaires. On peut en effet être amené à effectuer des mesures physiques (pH du sang, viscosité du sérum sanguin par exemple) et des vitesses de réaction (actions de ferments, de diastases, etc.). Les températures désirées dépassent rarement 40° et les produits mis en expérience sont le plus souvent peu volumineux. Ces raisons nous feront employer l'eau comme fluide intermédiaire et l'enceinte utilisées pour les expériences de longue durée pourra être constituée par un vase de Dewar de 3 à 5 litres. D'autre part le dispositif à circulation décrit se prête particulièrement à de telles recherches.

D. — *Recherches microbiologiques.*

En microbiologie, il peut être intéressant de posséder une enceinte à température constante pouvant se régler avec précision à des tempé-

ratures très voisines. Une enceinte de ce genre peut par exemple servir à déterminer la température optima de développement d'une culture microbienne. Les températures utilisables atteignent au plus 60° et permettent l'utilisation de l'eau comme fluide. Pour réaliser une telle enceinte, on prendra un vase de Dewar de 15 litres. Sa partie supérieure sera fermée par un bouchon percé de trous. Un trou central permettra le passage du dispositif de chauffage et d'agitation. Une série de trous disposés circulairement à la périphérie servira de support aux tubes à cultures. Par l'un d'entre eux sortira la branche libre du régulateur. Le tout peut être placé dans un récipient mettant les cultures à l'abri des contaminations de l'extérieur.

Comme on le voit l'application de notre méthode d'obtention de température régulière est susceptible de rendre service dans toutes les recherches scientifiques. Seul le matériel en expérience et les températures désirées nous font choisir les conditions de chauffage mais dans tous les cas il est possible d'obtenir, d'une manière rationnelle, les meilleurs résultats compatibles avec les conditions expérimentales.

CONCLUSION

De l'étude que nous venons de faire, il résulte, que pour l'obtention d'une température constante pratiquement utilisable, il ne suffit pas d'employer un régulateur sensible. Il faut également le placer dans des conditions rationnelles de fonctionnement. Pour pouvoir réaliser ces conditions d'une manière précise et stable, il est nécessaire d'utiliser une source de chaleur de rendement constant et une enceinte aussi insensible que possible aux variations de la température ambiante.

L'examen des différents modes de chauffage nous a montré que l'emploi de sources de chaleur par combustion apportait dans la solution du problème de la régulation thermique un facteur d'incertitude par suite du rendement calorifique excessivement variable que l'on peut en obtenir.

La transformation de l'énergie électrique en chaleur se prête au contraire d'une manière particulièrement avantageuse à cette application. Le rendement remarquablement constant du chauffage électrique, sa nature qui permet de l'utiliser à l'intérieur de l'enceinte et de l'y répartir selon les besoins, en font la source de chaleur la plus convenable pour un ensemble thermostatique. Bien que dans sa réalisation la plus courante, il ne puisse être réglé que par bonds, les résultats qu'il permet d'obtenir sont cependant très satisfaisants. Nous espérons qu'un dispositif, dont nous poursuivons actuellement, l'étude permettra, par un réglage progressif et automatique, de répondre aux plus grandes exigences.

Après avoir brièvement rappelé les modes de propagation de la chaleur, nous avons étudié l'influence de la puissance calorifique, de l'isolement thermique et de l'agitation mécanique du milieu chauffé sur l'allure de la courbe de régulation. Nous avons conclu qu'il y avait intérêt à utiliser une faible puissance calorifique, un très bon isolement et une agitation suffisante.

L'emploi d'une faible puissance calorifique entraîne une lente élévation de température. Pour l'obtention rapide de la température de

régime, il faut utiliser une grande puissance calorifique. D'où la nécessité dans un ensemble thermostatique pratique d'avoir à sa disposition plusieurs allures de chauffe, l'une correspondant à l'obtention, les autres au maintien de cette température.

Dans tous les cas, on réalisera le meilleur isolement compatible avec les conditions expérimentales. En effet, la pente de la courbe de refroidissement est d'autant plus faible et régulière que l'isolement utilisé est plus efficace.

Enfin, l'agitation permet d'obtenir rapidement, en facilitant l'échange de calories, l'homogénéité de la température de l'enceinte et le régime normal de fonctionnement. Selon les conditions expérimentales, on la réalise soit par des grandes hélices tournant lentement, soit par la rotation rapide d'hélices de petites dimensions.

Nous avons ensuite entrepris l'étude critique des régulateurs existants.

Après avoir passé en revue les différents types de régulateurs, nous avons éliminé, comme d'utilisation trop délicate et trop coûteuse, les régulateurs basés sur les variations des propriétés électriques et optiques des corps avec la température.

Nous avons vu que les régulateurs bi-métalliques ne sont pas d'un emploi assez général. Seuls les appareils ayant pour principe la dilatation de liquides ou de gaz, présentent un intérêt pratique. Malheureusement, ils ont de nombreux défauts : grande inertie calorifique d'où mise en équilibre lente et sensibilité variable — présence d'un capillaire où, par suite de la production répétée d'étincelles, le mercure s'encrasse et fait la queue, d'où mauvais fonctionnement — ajustement difficile du niveau.

Les nombreuses modifications apportées à l'appareil type montrent que ces inconvénients n'ont pas encore été complètement éliminés. Ces considérations nous ont amené à étudier un régulateur basé sur les variations de tension de vapeur qui, par son principe même, permet d'obtenir rapidement l'équilibre thermique et la sensibilité maxima de l'appareil. L'absence de capillaire, la production d'étincelles, extérieure au mercure actif du régulateur, ainsi qu'un ajustement progressif et stable du niveau lui donne une grande sûreté de fonctionnement. Enfin la sensibilité obtenue est, à volume égal, bien supérieure à celle d'un régulateur à dilatation, 40 c. c. permettant, dans des conditions d'utilisation pratiques, d'obtenir très facilement le $1/50^{\text{e}}$ de degré. Le principal défaut de ce régulateur est sa grande sensibilité aux variations de pression extérieure et nous avons envisagé les différentes façons de remédier,

soit par des dispositifs appropriés, soit par le calcul, à cet inconvénient.

Enfin, nous avons montré qu'un ensemble thermostatique, comprenant un chauffage électrique, une enceinte très bien isolée, dans laquelle est réalisée une agitation convenable, et un régulateur sensible et précis ne donnait de résultats satisfaisants que si les différents facteurs le constituant avaient des valeurs relatives bien déterminées. Nous avons vu que pour des conditions expérimentales données, nous ne pouvions, après avoir réalisé le meilleur isolement possible, qu'agir sur la puissance calorifique de la source, afin de réduire au minimum les écarts dus au retard de transmission de calories, retard que l'on ne peut jamais annuler complètement.

Nous avons ainsi été conduit à imaginer une méthode simple et rationnelle, permettant de déterminer à l'avance, pour un ensemble thermostatique donné, les meilleures conditions de fonctionnement. Cette méthode repose sur la construction et l'interprétation de deux courbes. La première dite courbe d'échange thermique, représente par rapport au temps, les variations thermiques de l'enceinte pendant la période d'échauffement avec la puissance calorifique maxima et la période de refroidissement consécutive. En interprétant cette courbe, on peut, par la mesure de 2 longueurs et l'application d'une formule simple, déduire l'intensité du courant qui, traversant la résistance chauffée, permettra de compenser exactement les pertes quand la température de l'enceinte aura une valeur déterminée par rapport à la température ambiante. Cette intensité permettra de calculer la valeur du rhéostat que l'on doit utiliser pour l'obtenir.

Si la température ambiante subit des variations importantes pendant la durée de l'expérimentation, on calcule les intensités et les résistances correspondantes aux valeurs extrêmes de la température ambiante et le régulateur n'agit que sur la différence de ces deux régimes de chauffage.

De cette courbe il est possible de déduire également la valeur en eau de l'enceinte et de calculer l'intensité du courant susceptible de faire varier sa température à une vitesse déterminée, ce qui peut être intéressant pour certaines mesures (point de fusion par exemple). Enfin, on peut calculer la chaleur de fonctionnement aux différents régimes de la résistance utilisée.

La deuxième courbe, dite courbe d'écart, permet de déterminer la température à laquelle il faudra couper le courant de chauffage préalable pour obtenir d'emblée, la température désirée. On la construit en notant les écarts entre les températures de coupure et les températures

maxima lorsque la différence de température entre l'enceinte et l'ambiance est de 10°, 20°, 30°, 40°, etc.

Après avoir exposé comment réaliser pratiquement un rhéostat progressif et utiliser les résultats obtenus par l'interprétation de ces courbes nous avons, par des exemples empruntés aux différents genres d'activité scientifique, montré comment la méthode exposée peut être rationnellement appliquée.

Notre but sera atteint si ce travail peut rendre quelques services à tous ceux dont les travaux scientifiques nécessitent l'obtention pratique de températures constantes.

Vu, bon à imprimer :
Le Président de la Thèse,

E. TASSILLY

Vu et permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY

Vu : le Doyen
Paul GUÉRIN

TABLE ALPHABÉTIQUE

- ABATI (G.). — Dr. Peters et Rost Neue Laboratorum Apparate, 1902, n° 37, p. 13. — (4).
- ADNET. — Notice 1900. *Nouveautés Chimiques*, 1901, p. 303. — (23).
 — Notice 1900. *Nouveautés Chimiques*, 1901, p. 305. — (15).
 — Notice. *Nouveautés Chimiques*, 1913, p. 82. — (26).
- ATKINSON (H. M.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1920, **39**, 298 T. — (39).
- AUBERT (M.). — Les Combustibles liquides et le problème du carburant National. — *Encyclopédie Léauté* (2^e série), 1924, Masson et C^{ie}. — (69).
- BEATTIE (J. A.) et JACOBUS (D. D.). — *J. of Phys. Chem.*, 1930, **34**, 1254/1259. — (62).
- BECKEL (A.). — *Chem. Zeit.*, 1932, **56**, 331/332. — (72).
- BERLEMONT. — *Bul. Soc. Chim.*, 1895 (3), **13**, 228. — (40).
- BIARD (E.). — *Semaine Gazière*, 1932, 120. — (3).
- BLACK (D. H.). — *J. Sc. Inst.*, 1928, **5**, 376/377. — (29).
- BORDIER (H.). — *Bul. Phar. de Lyon*, n° 1, janvier 1904, 306. — (63).
- BRUNING (H.). — *Chem. Fabrik*, 1931, **4**, 17/19. — (47).
- BURREWORTH (E.) et DERRER SMITH (A. O.). — *J. Sc. Inst.*, 1930, **7**, 233. — (49).
- CHENEVARD (P.). — Analyse dilatométrique des matériaux, 1929, Dunod, Paris. — (30).
- CHRIST (G.). — *Chem. Zeit.*, 1901, **25**, 1086. — (8).
- COLLINS (S. C.). — *J. Phys. Chem.*, 1929, **33**, 1650. — (67).
- CONNELLY (J. R.). — *Power*, 1931, **74**, p. 230-231. — (16).
- COPPOK (J. B. M.), COLVIN (J.) et HUME (J.). — *Chemistry and Industry*, 1932, **51**, 140. — (50).
- DEMOLT (E.) et MULLER (M.). — B. F., n° 578-260. — (28).
- DUANE et LORY. — *Am. J. Scien*, 1900 (4), **9**, 79. — (61).
- DUNNINGTON (F. P.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1895, **17**, 781. — (42).
- EPSTEIN. — Notice Peters et Rost (Berlin), n° 33, janvier 1901, p. 10. — (43).
- ESCLANGON (E.). — Mémoires de la Soc. des Sciences Physiques et Naturelles de Bordeaux, janvier 1911. — (68).

- EVANS (U.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1931, **50**, 66/67. — (20).
- FERGUSON (J. B.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1918, **40**, 929/930. — (44).
- FONTAINE (E.). — *Ann. Chim. Anal.*, 1911, **16**, p. 52. — (41).
- FREEMAN (N. H.). — E. P. 120.590. — (48).
- FRIEDRICHS (E.). — *Chem. Zeit.*, 1929, **53**, 480. — (46).
- HARVEY (A. B.). — *J. Biol. Chem.*, 1920, **41**, 9. — (45).
- HEYGENDORFF. — *Chem. Zeit.*, 1909, **33**, 244. — (71).
- HOLDE. — *Nouveautés Chimiques*, 1899, p. 38. — (6).
- HOUDARD. — *Nouveautés Chimiques*, 1910, p. 39. — (32).
- HUGERSHOFF (S.). — *Zeits. für Chem. Apparenkunde*, n° 4, 1905, 101. — (25).
- HUME (J.). — *J. Soc. Chim. Ind.*, 1924, **43**, 250 T/251 T. — (38).
- KOHLER (L.). — *Bull. Assoc. Franç. de propriétaires d'appareils à vapeur*, n° 45, juillet 1931, p. 1. — (12).
- LALANDE (A.). — Contribution à l'étude des équilibres physico-chimiques à basse température (Thèse de doctorat ès-sciences. Universités de Paris, 19 avril 1934). — (13).
- LECOMTE DU NOUY (P.). — Méthodes Physiques en biologie et en médecine, 1933. Baillière, Paris. — (14).
- LEQUEUX. — Notice, *Nouveautés Chimiques*, 1902, p. 75. — (24).
- LOUGININE. — *C. R. Ac. Sc.*, 1889, **108**, 620. — (2).
- LUMIÈRE (L. et A.). — Notice Ducat. *Nouveautés Chimiques*, 1902, 71. — (36).
- MACKALL (C. M.), MILLER (G. E.) et REID (E. E.). — *J. Ind. Eng. Chem.*, 1923, **15**, 121. — (5).
- MARIE (C.) et MARQUIS (R.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1903, **176**, 614. — (34).
- MENDELEIEF (J. J.). — *Prikladn. Khim.*, 1930, **3**, p. 759/764. — (18).
- MENZEL (G. W.). — *Chem. Repert. (Supplément Chem. Zeit)*, 1896, **11**, 89. — (22).
- MUENCKE. — *Nouveautés Chimiques*, 1912, p. 57/58. — (64).
- NEVEU (R.). — *Nouveautés Chimiques*, 1912, 59. — (37).
- OTHMER (D. F.). — *Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.)*, 1929, **1**, 97. — (65).
- PELLET. — Notice et travaux scientifiques, 1900, p. 86. — (70).
- PIDGEON (L. M.) et EGERTON (A. G.). — *J. Sc. Ins.*, 1931, **8**, 268/269. — (21).
- POLLISSAR (M. J.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1930, **52**, 636/637. — (66).
- RAMBERG (L.). — *Svensk. Khem. Tidskr.*, 1926, **38**, 94/95. — (52).
- et HEUBERGER (J. F.). — *Svensk. Kem. Tidskr.*, 1928, **40**, 227/229 et *Central Blatt. Zuck. Ind.*, 1928, **36**, 1326/1327. — (17).
- RATH (P.) et SIMON (A.). — *Chem. Fabrik*, 1932, **5**, 33. — (55).
- RAWLING (S. O.). — *J. Soc. Chem. Ind.*, 1922, **41**, 250 T/251 T. — (11).

- REGAUD et FOUILLAND. — *Ann. Chim. Anal.*, 1909, **14**, 141. — (51).
REGNARD (P.). — Notice Lequeux. *Nouveautés Chimiques*, 1902, 323. — (57).
SCHENK (P. W.). — *Ber. deut. Chem. Ges.*, 1931, **64**, 368/370. — (58).
SCHUYTEN (M. C.). — *Chem. Zeit.*, 1888, **22**, 1049. — (9).
SIMON (A.) et FISCHER (O.). — *Z. anorg. allg. chem.*, 1927, **162**, 279/286. — (54).
SLIGH (T. S.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1920, **42**, 60/68. — (56).
SODEAU (W. H.). — *The Analyst*, 1905, **30**, 106. — (31).
STOCK. — *Chem. Zeit.*, 1901, **25**, 545. — (38).
STOHMAN. — *J. f. prakt. Chem.*, 1885 (2), **31**, 299. — (1).
SUDBOROUGH. — *Chem. Cent. Blatt*, 1899, **12**, 721. — (7).
TIAN. — *J. Chim. Phys.*, 1922, **20**, 132. — (60).
VAN CAMPEN (P.). — *L. Elektroch.*, 1929, **35**, 265/266. — (59).
Vereignite Fabriken für Laboratorium Bedarf Prospect, n° 138, 1912, p. 2. — (27).
VERNON (W. H. S.). — *Trans. Farad. Soc.*, 1931, **27**, 241/247. — (19).
VILLIERS (A.). — *Bul. Sc. Ph.*, 1905, **12**, 9, 15. — (35).
WING (J. H.). — *Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.)*, 1930, **2**, 196/197. — (53).
WINTON (E.). — *J. Sc. Ins.*, 1929, **6**, 214/217. — (10).
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVANT-PROPOS.	9
INTRODUCTION.	10

CHAPITRE PREMIER

Sources de chaleur et enceintes.

I. — <i>Sources de chaleur</i>	12
A. — Généralités.	12
B. — Source de chaleur par combustion.	13
C. — Source de chaleur par échange thermique.	20
II. — <i>Enceintes</i>	30
A. — Généralités.	30
B. — Influence puissance calorifique	33
C. — Influence de l'agitation.	33
D. — Influence de l'isolement	35
E. — Quelques réalisations	37
F. — Conclusions.	40

CHAPITRE II

Les régulateurs de température.

I. — <i>Régulateurs existants</i>	41
A. — Généralités.	41
B. — Propriétés moléculaires	42
C. — Propriétés optiques	54
D. — Propriétés électriques	56
E. — Conclusions	58

II. — <i>Etude d'un nouveau régulateur</i>	59
A. — Généralités	59
B. — Construction du régulateur proprement dit. Forme, matière, dimension	61
C. — Echelle de température	66
D. — Action du régulateur sur la source chauffante.	69
E. — Calcul de l'appareil.	73
F. — Réalisation.	75
G. — Correction des variations de la pression atmosphérique.	76
H. — Résultats obtenus.	78

CHAPITRE III

Dispositifs thermostatiques.

A. — Généralités	80
B. — Courbe d'échange thermique.	82
C. — Courbe d'écart	87
D. — Réglage de la puissance calorifique	89
E. — Utilisation des résultats obtenus	91
F. — Quelques exemples d'applications.	92
G. — La régulation thermique et les sciences expérimentales.	101
CONCLUSION.	104
TABLE ALPHABÉTIQUE	108

